

VISIT...

LANZAROTE
Caliente.COM

621.18

Л 59

Д.Я. Кузьменко

**РЕГУЛИРОВАНИЕ
И АВТОМАТИЗАЦИЯ
ПАРОВЫХ КОТЛОВ**



621.18

К 89

Д. Я. Кузьменко

РЕГУЛИРОВАНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПАРОВЫХ КОТЛОВ

ВТОРОЕ ИЗДАНИЕ, ПЕРЕРАБОТАННОЕ
И ДОПОЛНЕННОЕ

Допущено Управлением руководящих кадров
и учебных заведений Министерства тяжелого и
транспортного машиностроения СССР в качестве
учебника для машиностроительных техникумов



МОСКВА «ЭНЕРГИЯ» 1978

Кузьменко Д. Я.

К 89 Регулирование и автоматизация паровых котлов: Учебник для машиностроительных техникумов. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Энергия, 1978. — 160 с., ил.

В книге изложены основные понятия о свойствах объектов регулирования и регуляторов; дано описание электронной аппаратуры авторегулирования; рассмотрены схемы автоматического регулирования, приведены основные положения по технологическим защита парогенераторов.

По сравнению с первым изданием («Автоматическое регулирование и технологические защиты паровых котлов») расширен объем сведений из теории автоматического регулирования, описаны приборы новой аппаратуры регулирования, приведены схемы регулирования проточных парогенераторов.

Книга написана в соответствии с программой одноименного курса для учащихся машиностроительных техникумов, специализирующихся по парогенераторостроению.

К 30303-021
051(01)-78 7-78

6П2.22

© Издательство «Энергия», 1978 г.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из важнейших направлений в создании материально-технической базы коммунизма является комплексная механизация и автоматизация производственных процессов.

При комплексной механизации ручной труд как на основных, так и на вспомогательных участках производственного процесса заменяется работой механизмов.

Вручную выполняются только работы, связанные с управлением механизмами. Комплексная механизация не только повышает производительность труда, но и облегчает труд человека.

Следующим этапом совершенствования производственных процессов является их автоматизация. Автоматизация — это применение комплекса средств, позволяющих осуществлять производственные процессы без непосредственного участия человека, но под его контролем.

Автоматизация производственных процессов приводит к увеличению выпуска, снижению себестоимости и улучшению качества продукции, уменьшает численность обслуживающего персонала, повышает надежность и долговечность машин, дает экономию материалов, улучшает условия труда и техники безопасности.

При комплексной автоматизации на автоматическое управление переводятся как основные, так и вспомогательные процессы, участки и агрегаты цеха или предприятия. При этом используются всевозможные средства автоматизации, в том числе и управляющие вычислительные машины, если применение их обосновано экономически.

Автоматизация освобождает человека от необходимости непосредственного управления механизмами. В автоматизированном процессе производства роль человека сводится к наладке, регулировке, обслуживанию средств автоматизации и наблюдению за их действием. Если

Глава первая

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

1. ПОНЯТИЕ О СИСТЕМЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Технологические процессы протекают в разнообразных объектах (аппаратах, машинах, двигателях и др.). Любой технологический процесс характеризуется одним или несколькими показателями (параметрами процесса). Такими показателями служат различные физические, химические или другие величины, например уровень воды в баке, температура в печи, содержание кислорода в дымовых газах парогенератора, частота вращения вала машины и т. п.

Во время работы объект, в котором протекает процесс, несет необходимую нагрузку. Для большинства объектов нагрузка изменяется во времени. Колебания нагрузки влекут за собой изменения параметра, характеризующего протекание процесса в объекте. Условия протекания процесса могут измениться также в результате нарушений, возникающих при работе объекта.

Задача регулирования состоит в том, чтобы поддерживать требуемые условия протекания процесса, восстанавливая их каждый раз, когда они нарушаются. Регулирование может осуществляться вручную обслуживающим персоналом или автоматически. Непрерывно протекающие технологические процессы, как правило, регулируются автоматическими регуляторами.

Автоматическим регулятором называется устройство, предназначенное для регулирования объекта без непосредственного участия человека. Объект, в котором протекает регулируемый процесс, принято называть регулируемым объектом (объектом регулирования).

Параметр, характеризующий условия протекания процесса и поддерживаемый регулятором, называется регулируемым параметром (регулируемой величиной).

Примером простейшего регулятора может служить поплавковый регулятор уровня жидкости в баке (рис. 1).

Усилие, развиваемое поплавком 1 при изменении уровня, передается рычагу 3, с помощью которого регулируется открытие клапана 2, а следовательно, и приток жидкости в бак.

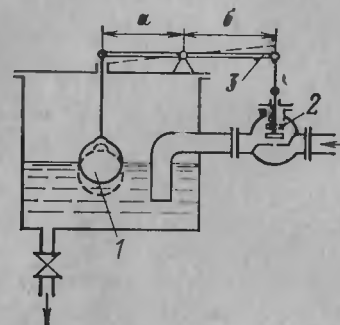


Рис. 1. Поплавковый регулятор уровня.

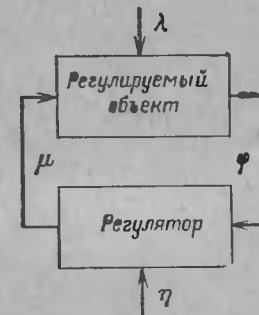


Рис. 2. Простейшая система автоматического регулирования.

Если количество жидкости, поступающей в бак, равно расходу ее из бака, уровень в нем сохраняется постоянным.

При увеличении расхода жидкости уровень в баке начнет снижаться. По мере снижения уровня поплавки будут опускаться и увеличивать открытие клапана. Поступление воды в бак будет возрастать. Процесс регулирования закончится, когда приток жидкости в бак сравняется с расходом ее из бака.

В процессе регулирования регулятор получает воздействие от объекта. Это воздействие сводится к тому, что регулятор воспринимает изменения регулируемого параметра, происходящие в объекте регулирования. В свою очередь регулятор, изменяя положение регулирующего органа, оказывает влияние на ход процесса в объекте регулирования, а следовательно, и на величину регулируемого параметра. Таким образом, регулируемый объект и регулятор связаны между собой и в хо-

де процесса регулирования взаимно действуют друг на друга.

Системой автоматического регулирования называется совокупность регулируемого объекта и управляющих им автоматических регуляторов.

Бак и регулятор, поддерживающий уровень жидкости в баке (рис. 1), являются примером простейшей системы автоматического регулирования.

Изображается простейшая система автоматического регулирования в виде замкнутого контура (рис. 2), состоящего из регулируемого объекта и регулятора. Назначение системы — поддерживать на заданном значении регулируемый параметр Φ . Заданное значение регулируемого параметра вводится в регулятор в виде задающего воздействия η , вырабатываемого специальным устройством — задатчиком.

В регуляторе происходит сравнение величины регулируемого параметра с заданным значением.

Если эти величины в течение некоторого времени равны, регулятор не оказывает воздействия на объект, состояние системы автоматического регулирования называется *устойчивым*. Установившееся состояние системы нарушается при возникновении возмущений.

Возмущением принято называть воздействие, нарушающее установившееся состояние системы регулирования, в результате которого регулируемый параметр отклоняется от заданного значения.

Возмущающие воздействия, нарушая нормальный ход процесса, приводят систему регулирования в *неустойчивое* состояние. При этом регулируемый параметр отклоняется от заданного значения. На входе регулятора появляется сигнал разности между заданным и действительным значениями регулируемого параметра, который называют *ошибкой регулирования*, или *сигналом рассогласования*. При наличии сигнала рассогласования на входе регулятора на выходе его вырабатывается сигнал, определяющий управляющее воздействие μ , возвращающее систему в установившееся состояние.

Элементы, входящие в систему автоматического регулирования, обычно обладают свойством направленного действия. Поступающие сигналы передаются лишь в одном направлении, например с выхода объекта на вход регулятора и т. д.

Обязательным условием функционирования системы автоматического регулирования является наличие замкнутого контура: выход объекта — вход регулятора — выход регулятора — вход объекта. Или, иначе говоря, все системы автоматического регулирования являются *замкнутыми системами*.

При нарушении одной из связей образуется разомкнутая система. Понятие разомкнутой системы обычно используется в расчетах систем автоматического регулирования.

а) Виды систем автоматического регулирования

В зависимости от требуемого закона изменения регулируемого параметра системы автоматического регулирования принято делить на системы стабилизации, программного регулирования и следящие. Перечисленные системы используются для автоматизации тепловых процессов на электростанциях.

Наибольшее распространение получили системы *стабилизации*, в которых регулируемый параметр поддерживается постоянным в течение длительного промежутка времени. Величина регулируемого параметра в любой момент может отклониться от заданного значения вследствие влияния возмущений. Основная задача системы стабилизации состоит в том, чтобы свести к наименьшему значению сигнал рассогласования, восстановив тем самым заданное значение регулируемого параметра. Для парогенератора, например, постоянными поддерживаются температура пара, уровень воды в барабане и др.

В системах *программного регулирования* значение регулируемого параметра изменяется во времени по заранее заданной программе. Выполнение программы регулирования с заданной точностью — такая главная задача системы программного регулирования. Кроме того, система программного регулирования должна устранять влияние возмущений, отклоняющих регулируемый параметр от значения, заданного программой. Программное регулирование находит применение, например, при автоматизации регулирования перегрева пара в процессе пуска парогенератора.

В *следящих системах* регулируемая величина изменяется в зависимости от какой-либо другой величины, характер изменения которой заранее неизвестен.

Примером следящей системы может служить регулирование подачи воздуха в топку парогенератора в зависимости от расхода топлива.

Одной из существенных характеристик систем автоматического регулирования является зависимость между установившимся значением регулируемого параметра и положением регулирующего органа. По виду таких характеристик различают статические и астатические системы.

Система автоматического регулирования называется линейной или нелинейной в зависимости от того, линейной или нелинейной является математическая зависимость, связывающая между собой выходные и входные величины системы.

Любая система автоматического регулирования должна быть устойчивой и обеспечивать требуемое качество регулирования.

б) Понятие об устойчивости и качестве регулирования

Процесс перехода системы регулирования от одного установившегося состояния к другому называется переходным процессом. Характер переходного процесса зависит от свойств объекта и регулятора.

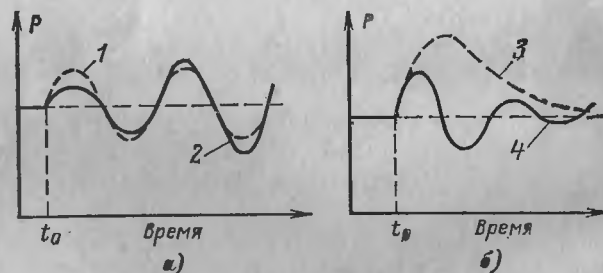


Рис. 3. Графики протекания процессов регулирования.
а — неустойчивого; б — устойчивого.

На рис. 3 изображены графики протекания различных процессов регулирования. По оси абсцисс отложено время, а по оси ординат — регулируемый параметр P .

Кривая 1 (рис. 3,а) изображает колебательный процесс, в ходе которого регулируемый параметр ко-

леблется около среднего своего значения с постоянной амплитудой. Кривая 2 относится к расходящемуся процессу, при котором амплитуда колебаний параметра с течением времени возрастает.

На рис. 3,б показаны аperiodический (кривая 3) и затухающий (кривая 4) процессы регулирования, в которых регулируемый параметр приходит к заданному значению.

Системы автоматического регулирования в соответствии с процессами, протекающими в них, могут быть устойчивыми и неустойчивыми. Устойчивая система через некоторое время после возмущения приходит к установившемуся состоянию. Неустойчивая система к установившемуся состоянию не приходит. Отклонение ее от состояния равновесия приводит к незатухающим или расходящимся колебаниям.

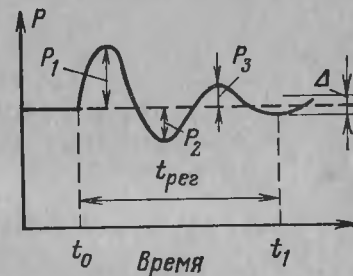


Рис. 4. График изменения регулируемого параметра после нанесения возмущения системе регулирования.

Система автоматического регулирования должна обладать определенным запасом устойчивости, чтобы колебания регулируемого параметра достаточно быстро затухали во всех режимах работы установки. Кроме запаса устойчивости, система регулирования должна обеспечивать необходимое качество процесса регулирования.

Простейшими показателями качества переходного процесса являются наибольшая величина отклонения регулируемого параметра и длительность его протекания.

На рис. 4 приведен график изменения регулируемого параметра P после нанесения системе регулирования возмущения в момент t_0 . Качество процесса характеризуется наибольшим отклонением регулируемой величины P_1 и временем регулирования $t_{\text{рег}}$. Время регулирования отсчитывают от начала переходного процесса до момента, когда колебания регулируемого параметра уже не выходят за пределы зоны нечувствительности.

В установившемся состоянии регулируемый параметр поддерживается в пределах зоны нечувствительности Δ ,

которая представляет собой сумму наибольших абсолютных значений положительного и отрицательного отклонений регулируемого параметра, еще не вызывающих действия регулятора.

Обычно процесс регулирования имеет слабо колебательный характер (рис. 4). О колебательности его судят по величине степени затухания.

Степенью затухания ψ называется отношение разности амплитуд двух соседних колебаний, направленных в одну сторону, к первой из них:

$$\psi = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \quad (1)$$

Для обеспечения требуемого запаса устойчивости систем автоматического регулирования парогенераторов величина степени затухания должна составлять $\psi = 0,75 \div 0,9$.

2. ДИНАМИЧЕСКИЕ ЗВЕНЬЯ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

При расчетах системы автоматического регулирования ее разбивают на ряд участков. Такие участки получили название динамических звеньев. Каждое звено имеет входную и выходную величину, между которыми существует обычно простая математическая зависимость.

Простейшую систему автоматического регулирования (рис. 2) можно представить двумя звеньями, одним из которых является регулируемый объект, другим — регулятор. Для регулируемого объекта входными величинами являются регулирующее воздействие μ и возмущение λ , а выходная величина одна — отклонение регулируемого параметра. Входными величинами регулятора служат отклонение регулируемого параметра ϕ и задающее воздействие η , а выходной величиной является регулирующее воздействие μ .

Динамические звенья системы автоматического регулирования обычно обладают свойством направленного действия. Это означает, что передача действия через звено осуществляется всегда в одном направлении: от входа к выходу. Характер изменений выходной величины определяется статическими и динамическими свойствами звена.

Статической характеристикой звена называют зависимость выходной величины $x_{\text{вых}}$ от вход-

ной $x_{\text{вх}}$ в установившемся состоянии:

$$x_{\text{вых}} = f(x_{\text{вх}}). \quad (2)$$

Примером статической характеристики может служить график зависимости термоэлектродвижущей силы (термо-э. д. с.) E термометра термоэлектрического (термопары) от температуры измеряемой среды (рис. 5, а).

Динамические свойства звена могут быть описаны в форме дифференциального уравнения, передаточной

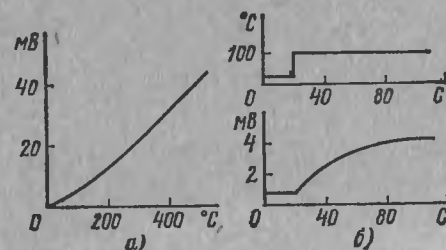


Рис. 5. Характеристики термоэлектрического термометра.

а — статическая; б — динамическая.

функции или амплитудно-фазовой характеристики либо представлены графически в виде временной или частотной характеристики.

Рассмотрим связь между дифференциальным уравнением и передаточной функцией на примере уравнения первого порядка вида

$$a_1 \frac{dx_{\text{вых}}(t)}{dt} + a_2 x_{\text{вых}}(t) = b_1 x_{\text{вх}}(t). \quad (3)$$

Уравнение (3) можно переписать в виде

$$a_1 p x_{\text{вых}}(t) + a_2 x_{\text{вых}}(t) = b_1 x_{\text{вх}}(t), \quad (4)$$

где $p = d/dt$ является символом дифференцирования. Умножение p на переменную $x_{\text{вых}}(t)$ следует понимать как дифференцирование переменной:

$$p x_{\text{вых}}(t) = \frac{dx_{\text{вых}}(t)}{dt}.$$

Деление на p означает операцию интегрирования:

$$\frac{x_{\text{вых}}(t)}{p} = \int x_{\text{вых}}(t) dt.$$

Уравнение (4) можно решать как алгебраическое относительно p :

$$\left[\frac{a_1}{a_2} p + 1 \right] x_{\text{вых}}(t) = \frac{b_1}{a_2} x_{\text{вх}}(t).$$

Обозначим $T=a_1/a_2$ и $K=b_1/a_2$. Тогда получим:

$$(Tp+1)x_{\text{вых}}(t)=Kx_{\text{вх}}(t). \quad (5)$$

Передаточной функцией уравнения (5) называют отношение

$$W(p)=\frac{K}{1+Tp}. \quad (6)$$

Если в выражение (6) подставить значение $p=i\omega$, где $i=\sqrt{-1}$, а ω — угловая частота колебаний, получим выражение для амплитудно-фазовой характеристики:

$$W(i\omega)=\frac{K}{1+(i\omega)T}. \quad (7)$$

Следует отметить, что встречаются динамические звенья, которые описываются нелинейными дифференциальными уравнениями. Исследование таких уравнений труднее, чем линейных. Поэтому нелинейное дифференциальное уравнение линеаризуют, т. е. заменяют его линейным дифференциальным уравнением, решение которого близко к решению исходного нелинейного уравнения.

а) Временные характеристики

Временной характеристикой звена называют зависимость изменения выходной величины во времени, полученную в результате определенного изменения воздействия на входе. Существуют два вида временных характеристик: кривая разгона и импульсная характеристика.

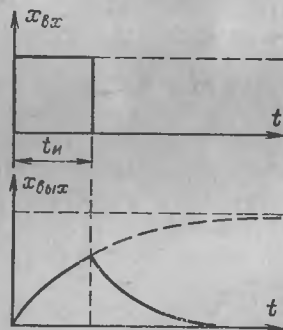


Рис. 6. Импульсная характеристика звена.

Выходная величина зависит не только от свойств звена, но и от вида и величины входного воздействия. Для оценки свойств звена обычно принято определять изменения выходной величины при однократном ступенчатом изменении входного сигнала. Кривая изменения выходной величины во времени при однократном ступенчатом изменении входного сигнала называется кривой

разгона (разгонной характеристикой) звена. В последнее время кривую разгона принято также называть переходной функцией.

Примером разгонной характеристики термометра термоэлектрического может служить кривая, изображенная на рис. 5,б.

Разгонные характеристики сравнительно просто получить опытным путем. Однако для некоторых технологических процессов не допускаются значительные отклонения выходных параметров по условиям взрывобезопасности, сохранения качества готовой продукции и т. п. В таких случаях для оценки динамических свойств объекта пользуются импульсной характеристикой.

Импульсной характеристикой звена называют зависимость выходной величины от времени при воздействии на входе сигнала в виде прямоугольного импульса. В качестве примера на рис. 6 приведена импульсная характеристика звена при воздействии входного сигнала $x_{\text{вх}}$ продолжительностью t_n . При этом выходной сигнал $x_{\text{вых}}$ не достигает значения, соответствующего единичному ступенчатому изменению $x_{\text{вх}}$.

Имея импульсную характеристику, можно построением получить соответствующую ей разгонную характеристику.

б) Частотные характеристики

Частотную характеристику можно получить путем подачи на вход звена синусоидальных или прямоугольных периодических колебаний.

Подадим на вход звена синусоидальные колебания (рис. 7), изменяющиеся по закону

$$x_{\text{вх}}(t)=A_{\text{вх}} \sin \omega t,$$

где $A_{\text{вх}}$ — амплитуда входного сигнала; $\omega=2\pi/T$ — угловая частота колебаний; T — период колебаний. Через некоторое время на выходе звена установятся вынужденные синусоидальные колебания с той же частотой, но отличающиеся по амплитуде и фазе:

$$x_{\text{вых}}(t)=A_{\text{вых}} \sin (\omega t-\varphi),$$

где $A_{\text{вых}}$ — амплитуда колебаний выходного сигнала; φ — сдвиг по фазе. Из рис. 7 следует, что для рассматриваемого звена выходной сигнал колеблется с большей амплитудой ($A_{\text{вых}}>A_{\text{вх}}$) и что он отстает от входного на время Δt или на угол

$$\varphi=\frac{2\pi}{T} \Delta t=\omega \Delta t.$$

уровня (рис. 1). Коэффициент усиления этого звена численно равен отношению плеч рычага, а именно: b/a .

Из уравнения усилительного звена (12) следует, что его передаточная функция является постоянной величиной и численно равна коэффициенту усиления:

$$W(p) = \frac{x_{\text{вых}}}{x_{\text{вх}}} = K. \quad (13)$$

Разгонная характеристика усилительного звена показана на рис. 9, а. Из характеристики следует, что вы-

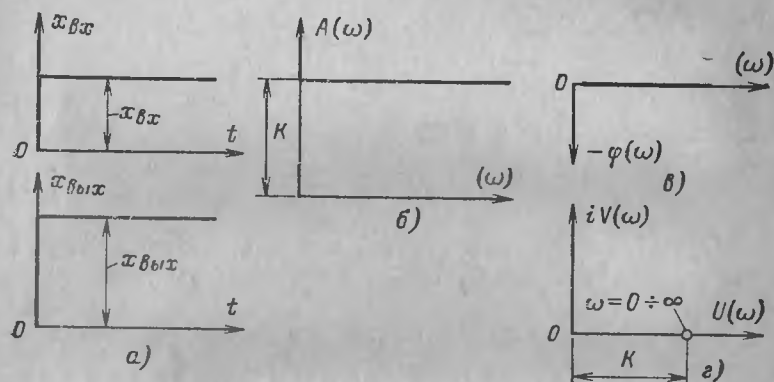


Рис. 9. Характеристики усилительного звена.

а — разгонная; б — амплитудно-частотная; в — фазочастотная; г — амплитудно-фазовая.

ходная величина $x_{\text{вых}}$ меняется одновременно с изменением входного сигнала $x_{\text{вх}}$, поэтому усилительное звено называют безынерционным.

Амплитудно-частотная характеристика звена определяется уравнением $A(\omega) = K$. График ее (рис. 9, б) представляет собой прямую, параллельную оси частот и отстоящую от оси на величину, равную коэффициенту усиления K .

Фазочастотная характеристика звена равна нулю: $\varphi(\omega) = \arctg 0 = 0$. На графике (рис. 9, в) она совпадает с осью частот.

Амплитудно-фазовая характеристика усилительного звена (рис. 9, г) изображается точкой на вещественной оси, отстоящей на расстоянии K от начала координат.

б) Инерционное звено

Свойства инерционного звена рассмотрим на примере баки 1 с водой (рис. 10, а). Приток воды в бак $Q_{\text{пр}}$ может регулироваться клапаном 2, сток $Q_{\text{ст}}$ — свободный. В установившемся состоянии $Q_{\text{пр}} = Q_{\text{ст}}$, поэтому уровень H сохраняется постоянным. Если увеличить приток, уровень начнет повышаться. Это вызовет увеличение стока за счет повышения напора H . Уровень будет повышаться до тех пор, пока сток не сравняется с прито-

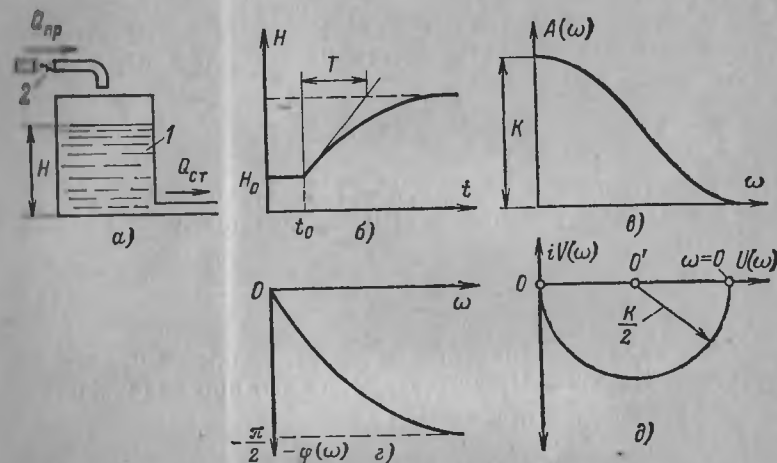


Рис. 10. Инерционное звено.

а — пример звена; б — кривая разгона; в — амплитудно-частотная; г — фазочастотная; д — амплитудно-фазовая характеристика.

ком воды в бак. Установившееся состояние наступит при новом значении уровня в баке. Поведение уровня в баке характеризуется кривой разгона (рис. 10, б).

Так как уровень в баке после нанесения возмущения устанавливается без вмешательства регулятора, рассматриваемое явление получило название самовыравнивания. Объекты, которым свойственно это явление, называют объектами с самовыравниванием.

Входной величиной $x_{\text{вх}}$ для рассматриваемого звена является изменение расхода воды на притоке $Q_{\text{пр}}$, выходной $x_{\text{вых}}$ — изменение уровня H . При скачкообразном увеличении притока величина стока $Q_{\text{ст}}$ не остается неизменной, а изменяется в зависимости от напора, созда-

ваемого уровнем воды в баке:

$$Q_{\text{ст}} = K_1 H, \quad (14)$$

где K_1 — коэффициент пропорциональности.

Разность между притоком и стоком $Q_{\text{пр}} - Q_{\text{ст}}$ приведет к изменению уровня воды в баке:

$$\frac{Q_{\text{пр}} - Q_{\text{ст}}}{\gamma} = S \frac{dH}{dt}, \quad (15)$$

где S — площадь поперечного сечения бака; γ — плотность воды.

Введя в полученное уравнение обозначение входной и выходной величин и подставив значение стока (14), получим:

$$\frac{x_{\text{вх}} - K_1 x_{\text{вых}}}{\gamma} = S \frac{dx_{\text{вых}}}{dt}. \quad (16)$$

Обозначим $T = \gamma S / K_1$ и $K = 1 / K_1$. Принятые обозначения введем в уравнение (16) и, преобразовав его, получим:

$$T \frac{dx_{\text{вых}}}{dt} + x_{\text{вых}} = K x_{\text{вх}}. \quad (17)$$

Мы получили линейное дифференциальное уравнение первого порядка. Проинтегрировав его при скачкообразном изменении $x_{\text{вх}}$, получим:

$$x_{\text{вых}} = K x_{\text{вх}} (1 - e^{-t/T}), \quad (18)$$

где T — постоянная времени; K — коэффициент усиления звена.

Самовыравнивание звена характеризуется степенью самовыравнивания, которая численно равна $\rho = 1/K$.

Передаточная функция инерционного звена может быть записана как

$$W(p) = \frac{K}{1 + Tp}. \quad (19)$$

Кривая разгона (рис. 10,б) представляет собой экспоненту, из которой следует, что выходная величина принимает новое установившееся состояние не мгновенно, а с некоторой инерцией. Поэтому такое звено называют инерционным, или аperiodическим.

Экспонента обладает следующим свойством: касательная, проведенная через начальную точку кривой,

характеризует скорость изменения выходной величины в начальный момент. Эта касательная отсекает на линии нового установившегося значения выходной величины отрезок T , представляющий собой время, необходимое для изменения выходной величины от исходного значения до нового установившегося при постоянной скорости, полученной в первоначальный момент. Величину T называют постоянной времени.

Таким образом, постоянная времени представляет собой промежуток времени, необходимый для достижения нового установившегося значения выходной величины при начальной скорости ее изменения.

Амплитудно-частотная характеристика инерционного звена определяется из выражения

$$A(\omega) = \frac{K}{\sqrt{1 + \omega^2 T^2}}. \quad (20)$$

Из рис. 10,в следует, что при частоте $\omega = 0$ $A(\omega) = K$. С увеличением частоты амплитуда выходных колебаний звена уменьшается и при некоторой частоте становится равной нулю.

Фазочастотная характеристика определяется из урав-

нения

$$\varphi(\omega) = -\arctg \omega T. \quad (21)$$

Графически она представляет собой кривую (рис. 10,г), которая с увеличением частоты стремится к углу сдвига, составляющему $-\pi/2$. Следовательно, в инерционном звене выходная величина отстает по фазе от входной.

Амплитудно-фазовая характеристика инерционного звена описывается уравнением

$$W(i\omega) = \frac{K}{1 + i\omega T}. \quad (22)$$

На рис. 10,д она представляет собой полуокружность в четвертом квадранте комплексной плоскости с радиусом $K/2$, касающуюся мнимой оси в начале координат, и с центром O' , расположенным на вещественной оси.

Инерционные звенья часто встречаются в системах автоматического регулирования тепловых процессов и в виде одноемкостных объектов с самовыравниванием, электрических цепочек RC и др.

в) Интегрирующее звено

Рассмотрим поведение уровня воды в баке 1, на сток которого установлен откачивающий насос 2 (рис. 11,а). При увеличении притока в момент t_0 поступление воды в бак увеличится, а расход через насос (сток) останется прежним. Как видно на графике характеристики разгона (рис. 11,б), уровень при этом повышается за счет дополнительного притока воды $\Delta Q =$

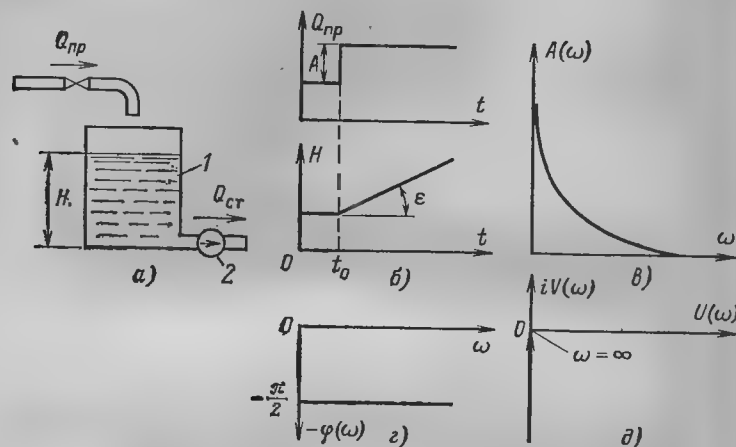


Рис. 11. Интегрирующее звено.

а — пример звена; б — кривая разгона; в — амплитудно-частотная; г — фазо-частотная; д — амплитудно-фазовая характеристики.

$= Q_{пр} - Q_{ст}$. Так как изменение уровня жидкости в баке не оказывает влияния ни на приток, ни на сток, рассматриваемый объект не обладает свойством самовыравнивания. Объект является интегрирующим звеном.

Интегрирующим называют звено, у которого скорость изменения выходной величины пропорциональна входному воздействию:

$$\frac{dx_{вых}}{dt} = \frac{1}{T_I} x_{вх}, \quad (23)$$

где T_I — постоянная времени интегрирующего звена.

Проинтегрировав обе части уравнения (23), получим:

$$x_{вых}(t) = \frac{1}{T_I} \int_0^t x_{вх}(t) dt. \quad (24)$$

Передаточная функция звена

$$W(p) = \frac{1}{T_I p}. \quad (25)$$

Разгонная характеристика интегрирующего звена — прямая (рис. 11,б), наклоненная к оси времени под углом ε , который определяется из уравнения

$$\operatorname{tg} \varepsilon = \frac{1}{T_I} A,$$

где A — величина входного возмущающего воздействия.

Амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики определяются из выражений:

$$A(\omega) = \frac{1}{T_I \omega} \quad (26)$$

$$\varphi(\omega) = -\frac{\pi}{2}. \quad (27)$$

Амплитудно-частотная характеристика (рис. 11,в) при нулевой частоте стремится к бесконечности. Если частота стремится к бесконечности, то $A(\omega)$ стремится к нулю.

Фазочастотная характеристика звена (рис. 11,г) представляет собой прямую, параллельную вещественной оси и отстоящую от нее на расстоянии $-\pi/2$.

Уравнение амплитудно-фазовой характеристики:

$$W(i\omega) = \frac{1}{T_I i\omega}. \quad (28)$$

На комплексной плоскости амплитудно-фазовая характеристика (рис. 11,д) представляет собой прямую, совпадающую с мнимой отрицательной полуосью.

В системах автоматического регулирования интегрирующими звеньями являются гидравлические исполнительные механизмы автоматических регуляторов, одно- и многоконтурные объекты без самовыравнивания и др.

г) Звено запаздывания

Примером объекта с запаздыванием может служить ленточный транспортер 2 (рис. 12,а), подающий уголь из бункера 1 в шаровую барабанную мельницу 3. Количе-

ство угля, поступающего в мельницу, регулируется устройством 4. При повышении толщины слоя угля на движущемся с постоянной скоростью транспортере увеличение его поступления в мельницу наступит по прошествии некоторого времени, которое и представляет собой запаздывание. Такое запаздывание называется транспортным, а звено запаздывающим.

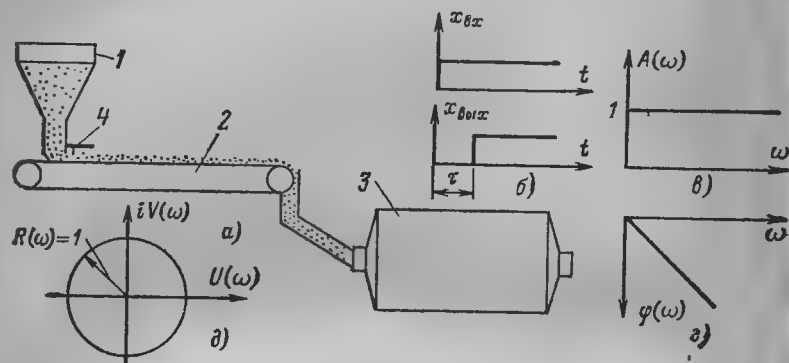


Рис. 12. Звено запаздывания.

а — объект, обладающий запаздыванием; б — разгонная характеристика; в — амплитудно-частотная; г — фазочастотная; д — амплитудно-фазовая характеристики.

Временная характеристика звена имеет форму скачка (рис. 12, б), сдвинутого относительно момента возмущения на отрезок τ , называемый временем запаздывания. Поэтому при $t \leq \tau$ имеем

$$x_{\text{вых}}(t) = 0, \quad (29)$$

при $t \geq \tau$

$$x_{\text{вых}}(t) = x_{\text{вх}}(t), \quad (30)$$

т. е. коэффициент усиления звена равен единице. Передаточная функция звена

$$W(p) = e^{-p\tau}. \quad (31)$$

Так как амплитуда входного сигнала при прохождении его через звено не изменяется, то амплитудно-частотная характеристика (рис. 12, в) параллельна оси частот и равна единице. Фазовый сдвиг линейно зависит от частоты:

$$\varphi(\omega) = \omega\tau. \quad (32)$$

Поэтому график фазочастотной характеристики (рис. 12, г) представляет собой прямую, исходящую из начала координат.

Амплитудно-фазовая характеристика звена определяется из выражения

$$W(i\omega) = e^{-i\omega\tau}. \quad (33)$$

Графически эта зависимость изображается окружностью (рис. 12, д) с центром в начале координат и радиусом, равным единице.

К запаздывающим звеньям относятся транспортеры и трубопроводы значительной длины.

д) Реальное дифференцирующее звено

Свойства реального дифференцирующего звена рассмотрим на примере RC-цепочки (рис. 13, а). При подаче на вход напряжения постоянного тока $U_{\text{вх}}$ в цепи воз-

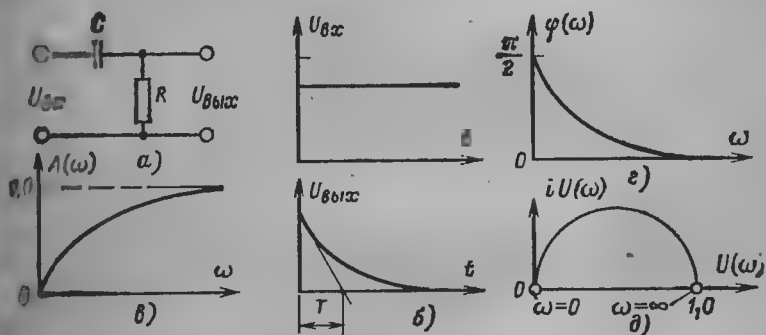


Рис. 13. Реальное дифференцирующее звено.

а — RC-цепочка; б — кривая разгона; в — амплитудно-частотная; г — фазочастотная; д — амплитудно-фазовая характеристики.

никает переходный процесс, характеризующийся током $I_n = I_C$, где

$$I_R = \frac{U_{\text{вых}}(t)}{R}; \quad (34)$$

$$I_C = C \frac{d(U_{\text{вх}} - U_{\text{вых}})}{dt}. \quad (35)$$

Приравняв (34) и (35), имеем:

$$U_{\text{вых}}(t) = RC \frac{d(U_{\text{вх}} - U_{\text{вых}})}{dt}.$$

После преобразования получим:

$$U_{\text{вых}}(t) + RC \frac{dU_{\text{вых}}(t)}{dt} = RC \frac{dU_{\text{вх}}(t)}{dt}. \quad (36)$$

Обозначим $RC = T$. Тогда формулу (36) можно записать в виде

$$Tx'_{\text{вых}}(t) + x_{\text{вых}}(t) = Tx'_{\text{вх}}(t). \quad (37)$$

Таким образом, изменение выходной величины зависит от производной входного сигнала, поэтому звено называется дифференцирующим. Решение уравнения (37) имеет вид:

$$x_{\text{вых}}(t) = e^{-t/T}. \quad (38)$$

Передаточная функция звена равна:

$$W(p) = \frac{Tp}{1 + Tp}. \quad (39)$$

Кривая разгона реального дифференцирующего звена (рис. 13,б) представляет собой экспоненту, асимптотически приближающуюся к оси времени, причем постоянная времени T является подкасательной к оси времени.

Для построения амплитудно-частотной характеристики (рис. 13,в) используется уравнение

$$A(\omega) = \frac{\omega T}{\sqrt{1 + \omega^2 T^2}}. \quad (40)$$

Фазочастотная характеристика (рис. 13,г) определяется выражением

$$\varphi(\omega) = \arctg \frac{1}{\omega T}. \quad (41)$$

Фазовый сдвиг положителен и в зависимости от частоты изменяется от $\pi/2$ до нуля. Поэтому реальное дифференцирующее звено относится к числу фазопережающих.

Амплитудно-фазовая характеристика звена (рис. 13,д) представляет собой полуокружность в первом квадранте комплексной плоскости, касающуюся мнимой оси в начале координат при $\omega = 0$.

4. КЛАССИФИКАЦИЯ И ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АВТОМАТИЧЕСКИХ РЕГУЛЯТОРОВ

В общем случае независимо от конструкции автоматический регулятор состоит из следующих основных элементов: измерительного устройства, регулирующего

прибора, управляющего устройства, исполнительного механизма и регулирующего органа.

Основной частью измерительного устройства является чувствительный элемент, воспринимающий отклонение регулируемого параметра. В измерительном устройстве отклонение регулируемого параметра преобразуется в сигнал, поступающий в регулирующий прибор.

В регулирующем приборе сигнал от измерительного устройства сравнивается с заданием, усиливается. На выходе прибора вырабатывается сигнал, с помощью которого приводится в действие исполнительное устройство, состоящее из исполнительного механизма и регулирующего органа.

Исполнительный механизм предназначен для перемещения регулирующего органа.

Примером регулирующего органа может служить клапан, управляющий поступлением воды в парогенератор.

Регулирующий орган в комплекте с исполнительным механизмом называется исполнительным устройством. Характеристики исполнительных устройств в значительной мере определяют качество регулирования.

а) Классификация автоматических регуляторов

Существенным признаком, характеризующим автоматические регуляторы, является отсутствие или наличие подвода к ним вспомогательной энергии от внешних источников. В соответствии с этим различают регуляторы прямого и непрямого действия.

У регуляторов прямого действия при изменении регулируемого параметра регулирующий орган приходит в действие непосредственно от усилий, возникающих в чувствительном элементе без использования вспомогательной энергии.

Регуляторы прямого действия просты по устройству, надежны и требуют незначительных эксплуатационных расходов. Вместе с тем они обладают невысокой чувствительностью и развивают незначительные усилия для управления регулирующими органами.

Регуляторы непрямого действия применяются в тех случаях, когда чувствительный элемент развивает достаточное усилие для непосредственного перемещения регулирующего органа.

У регуляторов непрямого действия для перемещения регулирующего органа при изменении регулируемого параметра используется энергия внешнего источника.

В зависимости от вида энергии регуляторы непрямого действия делятся на электрические, гидравлические, пневматические и комбинированные (электродравлические, электропневматические и т. п.).

Электрические регуляторы компактны, имеют малые массу и габариты. Применяемые в них сигналы можно усиливать, преобразовывать и передавать на значительные расстояния. Основными недостатками этих регуляторов являются громоздкость и сложность исполнительных механизмов электрического типа. Стоимость электрических регуляторов выше стоимости пневматических и гидравлических регуляторов.

Гидравлические регуляторы характеризуются высокой надежностью в работе. Исполнительные двигатели регуляторов развивают значительные усилия при высоком быстродействии. Однако эти регуляторы пожароопасны при применении масел в качестве рабочей жидкости. В случае применения воды они быстро изнашиваются из-за коррозии.

Пневматические регуляторы в сравнении с гидравлическими взрывопожаробезопасны. Однако они требуют установки весьма громоздких и дорогих компрессорных установок и тщательной очистки воздуха.

В процессе совершенствования появились комбинированные регуляторы, у которых измерительная часть выполняется электрической, а исполнительные механизмы — гидравлические или пневматические.

В зависимости от характера связи между отдельными элементами регуляторы бывают непрерывного и прерывистого действия.

У регуляторов непрерывного действия непрерывное изменение входных сигналов приводит к непрерывному изменению выходных величин.

К регуляторам непрерывного действия относятся все регуляторы прямого действия, а также гидравлические и пневматические регуляторы.

В конструкции регулятора прерывистого действия имеется элемент, работающий в режиме «включе-

но—выключено». К этим регуляторам относится большая часть электрических регуляторов.

Регуляторы часто называют по наименованию управляемых ими процессов, например регуляторы горения, перегрева пара и т. д., или по названию регулируемого параметра: регулятор давления, температуры и т. д.

Однако наиболее важно деление регуляторов в зависимости от реализуемых ими законов регулирования.

б) Понятие об основных законах регулирования

Требуемое качество процесса в системе автоматического регулирования обеспечивается за счет выбора закона регулирования, под которым понимается зависимость относительного перемещения регулирующего органа от относительного отклонения регулируемого параметра. Преимущественное применение в практике имеют регуляторы, работающие по следующим основным законам регулирования: пропорциональному, интегральному, пропорционально-интегральному, пропорционально-интегрально-дифференциальному.

У регуляторов, реализующих закон пропорционального регулирования, относительное перемещение регулирующего органа пропорционально относительному отклонению регулируемого параметра ϕ :

$$\mu = -K_1 \phi, \quad (42)$$

где K_1 — коэффициент пропорциональности.

Здесь и ниже знак минус в уравнениях означает, что регулирующее воздействие направлено в сторону, противоположную отклонению регулируемого параметра. Регуляторы, работающие по закону пропорционального регулирования, называют пропорциональными, или сокращенно П-регуляторами.

Динамические характеристики П-регулятора соответствуют характеристикам усилительного звена. Характеристика разгона П-регулятора приведена на рис. 14.

У регулятора, работающего по закону интегрального регулирования, регулирующее воздействие пропорционально интегралу отклонения регулируемого параметра:

$$\mu = -K_0 \int \phi dt. \quad (43)$$

Такой регулятор называют интегральным, или сокращенно И-регулятором. Динамические свойства И-регулятора соответствуют характеристикам ин-

тегрирующего звена. Это следует из характеристики разгона И-регулятора, приведенной на рис. 15.

Регулятор, работающий по пропорционально-интегральному закону регулирования, называют пропорционально-интегральным, или сокращенно ПИ-регулятором. У ПИ-регулятора скорость перемещения регулирующего органа пропорциональна откло-

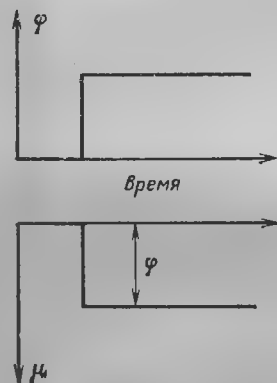


Рис. 14. Характеристика разгона П-регулятора.

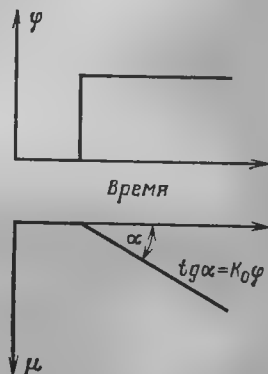


Рис. 15. Характеристика разгона И-регулятора.

нению регулируемого параметра и интегралу по времени от этого отклонения:

$$\mu = -K_1 \left(\varphi + \frac{1}{T_{\text{и}}} \int \varphi dt \right), \quad (44)$$

где $T_{\text{и}}$ — постоянная времени, характеризующая степень воздействия интегральной составляющей. Иногда эту постоянную называют временем изодрома ПИ-регулятора. Динамические характеристики ПИ-регулятора соответствуют характеристикам усилительного и интегрирующего звеньев, соединенных параллельно. Характеристика разгона ПИ-регулятора приведена на рис. 16.

У регулятора, работающего по пропорционально-интегрально-дифференциальному закону регулирования, скорость перемещения регулирующего органа пропорциональна отклонению регулируемого параметра, интегралу

и скорости изменения этого отклонения:

$$\mu = -K_1 \left(\varphi + \frac{1}{T_{\text{и}}} \int \varphi dt + T_{\text{пр}} \frac{d\varphi}{dt} \right). \quad (45)$$

Постоянная времени $T_{\text{пр}}$ называется временем предварения и характеризует степень участия скорости отклонения параметра $d\varphi/dt$ в законе регулирования. Такие регуляторы называют пропорционально-интегрально-дифференциальными, или со-

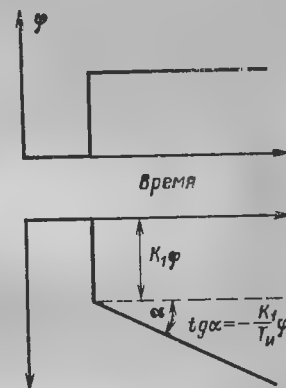


Рис. 16. Характеристика разгона ПИД-регулятора.

кращенно ПИД-регуляторами. Динамические характеристики ПИД-регулятора соответствуют суммарной характеристике трех звеньев: усилительного, интегрирующего и дифференцирующего, соединенных параллельно.

5. АСТАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ

Рассмотрим процесс регулирования уровня в баке электромеханическим регулятором (рис. 17). Объектом регулирования служит бак 1, в котором должен поддерживаться заданный уровень. Так как изменения уровня не влияют ни на приток, ни на сток, объект не обладает самовыравниванием.

По трубе 2 в бак поступает вода, расход которой регулируется клапаном 3. Из бака вода откачивается насосом 4. Уровень в баке измеряется поплавком 5. При отклонении уровня от заданного положения замыкаются контакты, установленные на колодке 6, неподвижно за-

крепленной на баке. При этом к сети подключается реверсивный электродвигатель 7, изменяющий с помощью редуктора 8 степень открытия клапана.

На рис. 18 показан график регулирования уровня. До момента t_0 приток воды $Q_{\text{п}}$ был равен стоку $Q_{\text{с}}$, поэтому уровень H в баке сохранялся постоянным. Поплавок занимал положение, при котором контакты были разомкнуты и электродвигатель отключен.

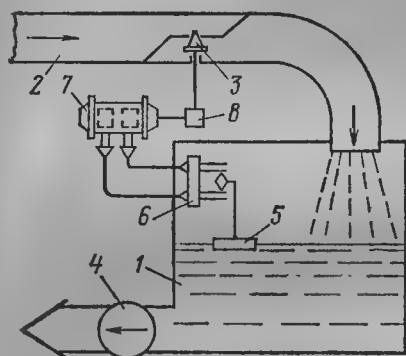


Рис. 17. Схема регулирования уровня в баке астатическим двухпозиционным регулятором при отсутствии самовыравнивания.

В момент t_0 сток (линия 2) был уменьшен, после чего уровень (кривая 3) начал расти, поднимая поплавок. Верхние контакты замкнулись, и электродвигатель будет прикрывать клапан, уменьшая приток (линия 1) воды в бак.

По мере уменьшения разности между притоком и стоком скорость повышения уровня постепенно уменьшится. В момент t_1 приток сравняется со стоком и нарастание уровня прекратится. Однако уровень окажется выше заданного, поэтому контакты останутся замкнутыми и электродвигатель продолжит прикрытие клапана. Приток становится меньше стока, поэтому уровень начнет снижаться.

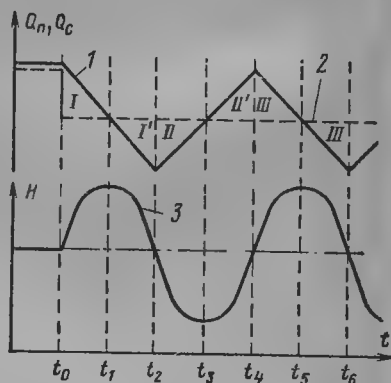


Рис. 18. График регулирования уровня в баке к рис. 17.

см. В момент t_2 уровень достигнет заданного положения. Так как в этот момент приток оказался меньше стока, уровень, продолжая снижаться, вызовет замыкание нижних контактов, и электродвигатель начнет вращаться в обратном направлении. В момент t_4 приток, сток и уровень займут положение, соответствующее начальному (в момент t_0). Далее описанный цикл повторится.

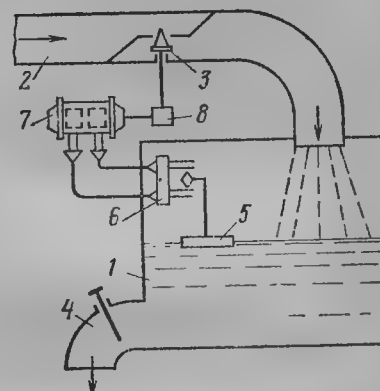


Рис. 19. Схема регулирования уровня в баке астатическим двухпозиционным регулятором при наличии самовыравнивания.

Таким образом, регулируемый уровень после нанесения возмущения будет совершать незатухающие колебания с постоянной амплитудой. Приток также будет колебаться.

При уменьшении величины возмущения или увеличении быстродействия регулятора амплитуда колебаний уровня уменьшится, но при этом колебательный характер процесса сохранится.

На рис. 18 показаны графики идеализированного процесса, при котором площади треугольников, характеризующие небаланс притока и стока и обозначенные через I и I', II и II' и т. д., равны между собой.

Наличие у реального регулятора нечувствительности, трения и зазоров в механизме, а также выбега у электродвигателя приводит к тому, что процесс становится расходящимся. Таким образом, система регулирования, состоящая из объекта, лишенного самовыравнивания, и рассмотренного регулятора, неустойчива.

Рассмотрим процесс регулирования уровня электро-механическим регулятором в объекте с самовыравнива-

нием (рис. 19). До момента t_0 (рис. 20) система находилась в равновесии, т. е. $Q_{\text{п}}=Q_{\text{с}}$. В момент t_0 сток скачкообразно уменьшен и уровень (линия 5) начал возрастать. Регулятор включился в работу, снижая приток (линия 1). С ростом уровня сток увеличивается (линия 2) за счет самовыравнивания. Поэтому разность между притоком и стоком $\Delta Q=Q_{\text{п}}-Q_{\text{с}}$ уменьшается быстрее, чем при отсутствии самовыравнивания.

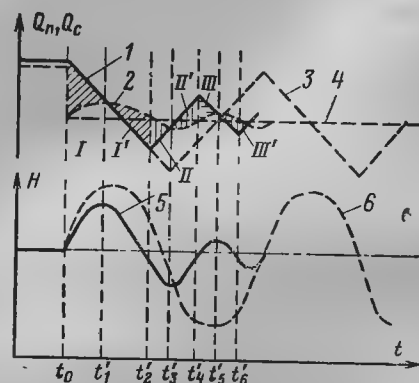


Рис. 20. График регулирования уровня в баке к рис. 19.

Для сравнения на графике помещены линии притока 3, стока 4 и уровня 6 для объекта без самовыравнивания.

В момент t_1 приток и сток сравнялись. Однако количество воды, накопившееся в баке за счет небаланса притока и стока (заштрихованная площадка I), оказалось меньше, чем при отсутствии самовыравнивания, поэтому наибольшее отклонение уровня тоже оказалось меньше.

После момента t'_1 приток становится меньше стока и оба они снижаются. Так как приток уменьшается быстрее, чем сток, уровень также будет снижаться. В момент t'_2 уровень возвращается к начальному значению, но будет продолжать снижаться, так как приток меньше стока. Снижение уровня ниже заданного значения вызывает переключение регулятора на увеличение притока. Благодаря самовыравниванию объекта сниже-

ние стока по мере снижения уровня будет продолжаться.

В момент t'_3 приток и сток сравнялись при наименьшем значении уровня. Амплитуда отклонения уровня от заданного значения в этот момент меньше, чем в момент t'_1 . Далее процесс будет повторяться при постепенном уменьшении амплитуды и периода колебаний.

Таким образом, процесс имеет затухающий колебательный характер, и регулирование протекает устойчиво. Устойчивость регулирования в данном случае обеспечивается благодаря свойству самовыравнивания объекта.

В рассмотренном процессе регулятор после нанесения возмущения восстанавливает уровень на одном и том же заданном значении независимо от положения регулирующего органа. Такие системы регулирования называются статическими.

В общем случае астатическим называют такое регулирование, при котором в установившемся состоянии системы отклонение регулируемого параметра от заданного значения равно нулю при любой величине возмущения и независимо от положения регулирующего органа.

Статической характеристикой системы регулирования называется зависимость между установившимися значениями регулируемого параметра и величиной регулирующего воздействия. Статическая характеристика астатической системы изображена на рис. 21. Из характеристики следует, что в астатической системе сохраняется постоянное установившееся значение регулируемого параметра P_0 во всем диапазоне изменений нагрузок объекта от наименьшей $D_{\text{наим}}$ до наибольшей $D_{\text{наиб}}$.

На примере простейшего регулятора уровня в баке (рис. 19) было показано, что устойчивость процесса астатического регулирования обеспечивается благодаря свойству самовыравнивания объекта. Поэтому простейшие системы астатического регулирования могут применяться только на объектах с большим самовыравнива-

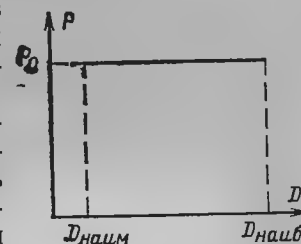


Рис. 21. Статическая характеристика астатического регулирования.

нием. На объектах с малым самовыравниванием, а также обладающих значительным запаздыванием, применение таких систем может привести к незатухающим и даже расходящимся колебательным процессам. Достоинством астатических систем является их высокая статическая точность во всех режимах работы регулируемого объекта.

6. СТАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ

Для обеспечения устойчивого регулирования объектов без самовыравнивания в регулятор вводится так называемая жесткая обратная связь. В этом случае величина параметра, поддерживаемого регулятором, зависит от положения регулирующего органа, т. е. регулирование происходит по пропорциональному закону.

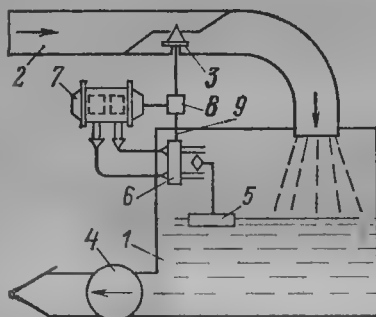


Рис. 22. Схема регулирования уровня в баке без самовыравнивания регулятором с жесткой обратной связью.

Рассмотрим процесс регулирования уровня в баке, не обладающий самовыравниванием, электромеханическим регулятором с жесткой обратной связью (рис. 22).

Вода подается в бак 1 по трубе 2 и откачивается из него насосом 4. Уровень воды измеряется поплавком 5, как и в объектах, показанных на рис. 17 и 19. Однако здесь контактная колодка 6 не закреплена на баке, а с помощью стержня 9 и редуктора 8 жестко связана с клапаном 3. Перемещая клапан, электродвигатель 7 одновременно переставляет контактную колодку 6. При перемещении клапана в сторону закрытия контактное устройство поднимается, а при движении клапана в обратную сторону — опускается. Жесткая обратная связь осуществляется стержнем 9.

График процесса регулирования приведен на рис. 23. В момент t_0 сток был скачкообразно уменьшен (линия 3) и уровень начал расти (линия 4). Регулятор вступает в действие и уменьшает приток (линия 1). Одновременно стержень 9 начнет перемещать вверх контактную колодку (линия 5). В момент t_1 приток и сток сравняются, а уровень будет иметь наибольшее отклонение. Так как уровень превышает заданное значение, регулятор продолжает уменьшать приток, а контактная колодка по-прежнему перемещается вверх.

В момент t_2 поднимающаяся колодка и опускающийся вместе суровнем поплавков займут положение, при котором верхние контакты окажутся разомкнутыми (точка пересечения линий 4 и 5 на графике). В результате размыкания контактов регулятор отключится, но продолжающееся снижение уровня вызовет замыкание нижних контактов и включение регулятора в сторону увеличения притока. С момента t_2 открытие клапана будет увеличиваться, а колодка перемещаться вниз.

В момент t_3 приток сравняется со стоком при наименьшем значении уровня. Поэтому регулятор продолжает открытие клапана и одновременно будет перемещать колодку вниз.

В момент t_4 контакты вновь переключат электродвигатель, и регулятор начнет уменьшать приток.

Процесс регулирования будет продолжаться в таком же порядке до наступления состояния равновесия, при котором устанавливается новый уровень, который на величину ΔH выше первоначального.

Новое положение уровня определяется положением клапана и жестко связанной с ним колодки. При увеличении скорости перемещения колодки колебания уровня затухают быстрее, но разность между первоначальным и новым значениями регулируемого параметра, т. е. неравномерность регулирования, увеличивается.

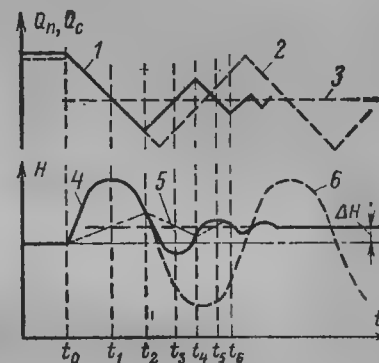


Рис. 23. График регулирования уровня в баке к рис. 22.

Неравномерностью регулирования называется разность между наибольшим и наименьшим значениями регулируемого параметра в установившихся состояниях системы.

Для сравнения на графике (рис. 23) изображено поведение притока (линия 2) и уровня (линия 6) для регулятора без жесткой обратной связи.

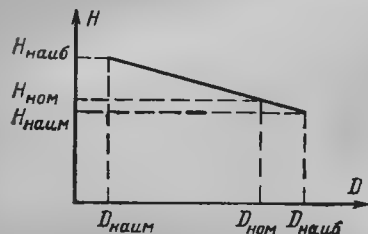


Рис. 24. Характеристика статического регулирования.

Таким образом, ввод в регулятор жесткой обратной связи обеспечивает устойчивое регулирование процесса в объекте без самовыравнивания за счет неравномерности регулирования. Подобные системы регулирования называются статическими.

Статическая характеристика рассмотренной системы регулирования приведена на рис. 24. Величина неравномерности регулирования (статическая ошибка) определяется разностью $\Delta H = H_{\text{наиб}} - H_{\text{наим}}$. Чем больше величина возмущения, тем больше статическая ошибка, что является недостатком статических систем регулирования. Достоинства их — высокая устойчивость и быстродействие.

7. ИЗОДРОМНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ

Попробуем объединить достоинства простейшей астатической и статической систем регулирования. С этой целью рассмотрим процесс регулирования объекта без самовыравнивания регулятором с упругой обратной связью.

Упругой называют обратную связь, действующую по скорости перемещения регулирующего органа. Конструктивно упругая обратная связь выполняется в виде так называемого изодрома, поэтому системы регулирования иногда называют изодромными. На рис. 25 в качестве примера показан гидравлический изодром, включенный между редуктором 8 и контактной колодкой 6, опирающейся на пружину 10. Механизм изодрома состоит из цилиндра 9, жестко связанного с редуктором 8. В цилиндре находится поршень, шток которого

связан с колодкой 6. Цилиндр заполнен маслом. Разделенные поршнем полости цилиндра сообщаются через дроссельный вентиль 11.

При перемещении клапана 3 масло в цилиндре изодрома не успевает перетекать из одной полости в другую, поэтому изодромное устройство работает как жесткий стержень, перемещающий контактную колодку. Одновременно изменяется сжатие пружины 10. После выключения регулятора масло в изодроме под действием пружины перетекает из одной полости в другую, в результате чего поршень и связанная с ним контактная колодка перемещаются.

Из упрощенного графика регулирования уровня (рис. 26) следует, что при уменьшении стока (линия 2)

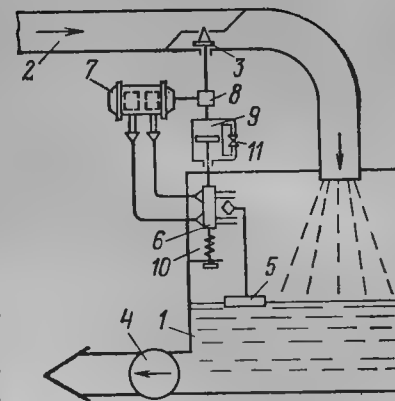


Рис. 25. Схема регулирования уровня в баке без самовыравнивания регулятором с упругой обратной связью.

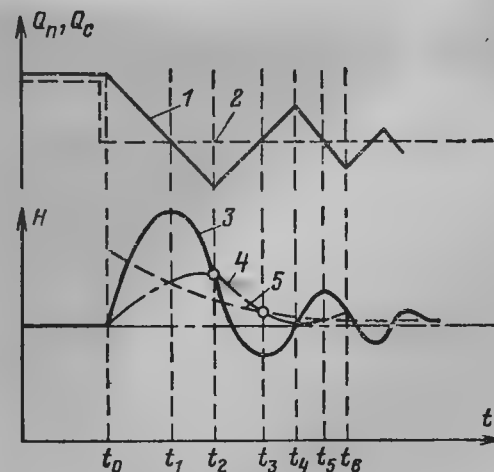


Рис. 26. Упрощенный график регулирования уровня в баке к рис. 25.

приток (линия 1) снижается и контактная колодка движется не с постоянной скоростью, как в предыдущем примере (линия 5, см. рис. 23), а с замедлением (линия 4, рис. 26). Под воздействием пружины колодка постепенно возвращается к первоначальному положению, соответствующему заданному значению уровня. Поэтому колебания уровня, существенные в начале процесса, постепенно уменьшаются, и уровень (линия 3) принимает первоначальное значение. Колебания уровня около оси (линия 5) постепенно затухают. Конечная неравномерность регулирования равна нулю.

Таким образом, системы регулирования с изодромными регуляторами являются астатическими системами регулирования и обладают высокой устойчивостью. Если закрыть дроссельный вентиль 11 (рис. 25), система регулирования превратится в статическую. Если полностью открыть вентиль 11, так чтобы масло могло свободно перетекать из одной полости цилиндра в другую, получим простейшую астатическую систему, рассмотренную выше.

Изодромное регулирование можно применять при разнообразных условиях работы и различных свойствах регулируемого объекта. При этом можно обеспечить необходимый запас устойчивости и достаточно высокое качество регулирования.

Контрольные вопросы

1. В чем различие между механизацией и автоматизацией производства?
2. Какие преимущества дает автоматизация парогенераторов?
3. Перечислите виды автоматизации парогенераторов.
4. В чем состоит задача автоматического регулирования процесса?
5. Расскажите о действии простейшей системы автоматического регулирования.
6. Охарактеризуйте систему автоматической стабилизации.
7. Как осуществляется программное регулирование?
8. Что называется переходным процессом?
9. Чем характеризуется переходный процесс устойчивой системы автоматического регулирования?
10. Охарактеризуйте показатели качества переходного процесса.
11. Что называют статической характеристикой звена?
12. Назовите формы описания динамических свойств звена.
13. В чем различие между кривой разгона и импульсной характеристикой?
14. Как получают частотные характеристики звена?
15. Назовите виды частотных характеристик.
16. Перечислите основные элементарные типовые звенья.

17. Приведите пример звена запаздывания.
18. Как проявляется свойство самовыравнивания объекта?
19. Перечислите основные элементы регулятора.
20. Сравните работу регуляторов непрерывного и прерывистого действия.
21. Что называется законом регулирования?
22. Перечислите основные законы регулирования.
23. Какова роль жесткой обратной связи в регуляторе?
24. Что называется неравномерностью регулирования?
25. Расскажите об устройстве изодрома.

Глава вторая

ЭЛЕКТРОННЫЕ РЕГУЛЯТОРЫ

8. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Всесоюзным теплотехническим институтом (ВТИ) имени Ф. Э. Дзержинского была разработана электронная система регулирования, получившая большое распространение. Основу этой системы составляют электронные импульсные регуляторы с электрическими исполнительными механизмами постоянной скорости. В дальнейшем на базе этой системы были разработаны новые, более совершенные системы регулирования.

Для автоматизации парогенераторов применяются регуляторы, выпускаемые Московским заводом тепловой автоматики (МЗТА). Электронные регуляторы изготавливаются также Чебоксарским заводом электрических исполнительных механизмов (ЧЗЭИМ).

До 1965 г. МЗТА изготавливал регуляторы серии РПИК. Регулятор этой серии имеет двухламповый усилитель. Выход у регулятора линейный, и он относится к числу контактных. После 1965 г. МЗТА перешел на серийное изготовление регуляторов серии РПИБ, входной каскад которых выполнен на одной лампе. Дальнейшее усиление и преобразование сигнала осуществляется полупроводниковыми элементами. РПИБ имеет триггерный выход, поэтому регулятор называют бесконтактным.

Наряду с изготовлением регуляторов РПИБ с 1974 г. МЗТА выпускает регуляторы новой серии, получившие наименование «Каскад». Особенностью этих регуляторов является использование унифицированного сигнала постоянного тока 0—5 (или 0—20) мА. Приборы построены на полупроводниковых и магнитных элементах и представляют собой совокупность унифицированных нормализованных блоков. Регуляторы серии «Каскад»

являются электрической ветвью Государственной системы приборов (ГСП).

Отличительная особенность аппаратуры ГСП состоит в том, что ее приборы и устройства имеют единые параметры входных и выходных сигналов и нормализованные присоединительные размеры. Унифицированный сигнал можно использовать многократно и тем самым сократить количество применяемых приборов.

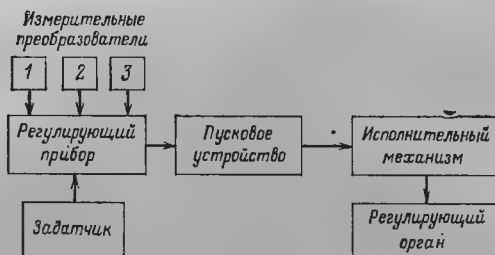


Рис. 27. Структурная схема электронного регулятора.

Электронные регуляторы позволяют осуществлять следующие законы регулирования:

- 1) пропорциональный (регулирование с жесткой обратной связью по положению исполнительного механизма);
- 2) пропорционально-интегральный;
- 3) пропорционально-интегрально-дифференциальный (при подключении на вход регулятора сигнала непосредственно и через дифференциатор).

Основные элементы электронного регулятора показаны на структурной схеме (рис. 27). Измерительные преобразователи воспринимают регулируемые величины и преобразовывают их в электрические сигналы. В регуляторах серии РПИБ используются сигналы переменного или постоянного тока. Для регуляторов «Каскад» регулируемые параметры преобразовываются в унифицированный сигнал постоянного тока. Унифицированный сигнал получают с помощью нормирующего преобразователя. Конструктивно этот преобразователь выполняется в виде самостоятельного прибора либо встраивается в корпус измерительного преобразователя.

Регулирующий прибор состоит из двух блоков: измерительного и электронного.

В регуляторах серии РПИБ оба блока размещены в одном корпусе, в регуляторах «Каскад» каждый блок является самостоятельным прибором.

В измерительном блоке сигналы от измерительных преобразователей суммируются и сравниваются с сигналом от задатчика.

В случае отклонения регулируемых величин от заданного значения на выходе измерительного блока возникает сигнал, поступающий в электронный блок. В электронном блоке суммарный сигнал усиливается до величины, необходимой для работы пускового устройства, и преобразуется по требуемому закону под действием устройства обратной связи. Электронные регуляторы относятся к регуляторам прерывистого действия. Их выходной сигнал представляет собой последовательность импульсов различной продолжительности и знака, управляющих пусковыми устройствами.

В качестве пусковых устройств используются тиристорные и магнитные усилители, реже — реверсивные магнитные пускатели. Пусковое устройство воздействует на исполнительный механизм постоянной скорости, интегрирующий импульсный сигнал на выходе регулятора. Требуемый закон регулирования формируется только на выходе регулирующего органа.

Различают электронные регулирующие и корректирующие (аналоговые) приборы. Корректирующие приборы являются регуляторами непрерывного действия. На выходе корректирующего прибора в соответствии с требуемым законом регулирования формируется сигнал, используемый для управления регулирующими приборами.

Помимо регулирующих корректирующих приборов, в схемах автоматического регулирования применяются вспомогательные электронные устройства: дифференциаторы, переключатели, сумматоры, множители и др.

9. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

В схемах электронных регуляторов часто применяются стандартные измерительные преобразователи, широко используемые в системах теплотехнического контроля. К ним относятся манометры, дифференциальные

манометры, дифференциальные тягомеры, термометры термоэлектрические, электрические термометры сопротивления.

а) Преобразователи давлений и перепадов давлений

К этой группе преобразователей относятся манометры, дифференциальные манометры (дифманометры) и дифференциальные тягомеры (дифтягомеры). В качестве чувствительных элементов у этих преобразователей применяются трубчатые манометрические пружины и мембранные коробки.

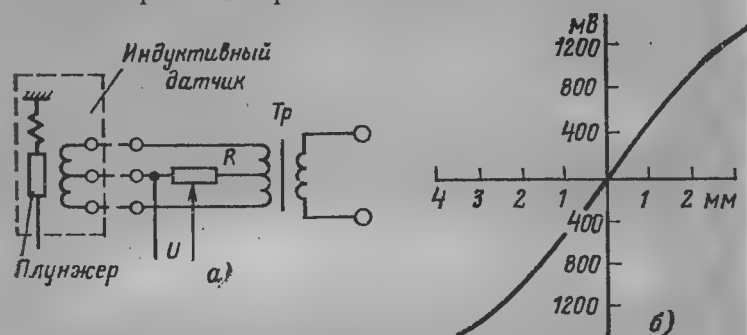


Рис. 28. Преобразователь индуктивный.
а — схема включения; б — характеристика преобразователя.

Перемещения чувствительного элемента преобразуются в электрический сигнал переменного тока с помощью преобразователя индуктивного или дифференциально-трансформаторного типа.

Преобразователь индуктивного типа. Преобразователь индуктивного типа представляет собой обмотку, внутри которой помещен сердечник-плунжер, соединенный с подвижной частью чувствительного элемента.

Схема включения индуктивного преобразователя в измерительный блок регулятора приведена на рис. 28,а. Катушки преобразователя питаются от вторичной обмотки трансформатора Tr измерительного блока. Обмотки трансформатора и преобразователя образуют мост переменного тока, в диагональ которого включен резистор R .

При среднем положении плунжера индуктивные сопротивления катушек K_1 и K_2 преобразователя равны

мостовая схема находится в равновесии. При отклонении плунжера от среднего положения в диагонали моста возникает ток. Величина тока зависит от степени отклонения плунжера от среднего положения, а фаза — от направления отклонения. Величина напряжения U на резисторе R служит сигналом, характеризующим отклонение параметра от заданного значения.

На графике рис. 28,б показан характер изменения напряжения, снимаемого с резистора R , в зависимости от положения плунжера. График называется характеристикой преобразователя. Линейный участок характеристики составляет ее рабочую часть. Изменение напряже-

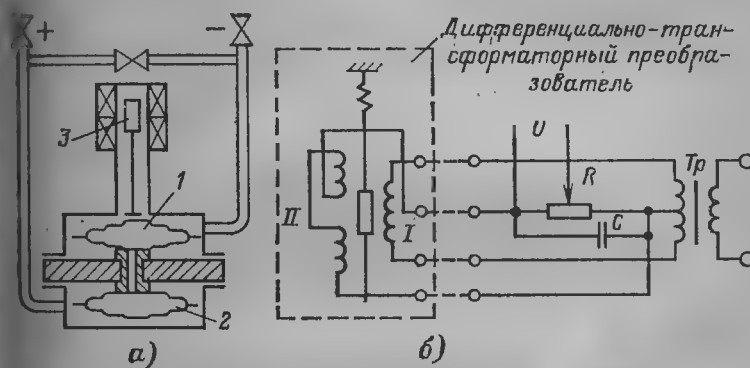


Рис. 29. Дифференциальный манометр типа ДМ.
а — устройство; б — схема присоединения к измерительному блоку регулирующего прибора.

ния, соответствующее смещению плунжера на 1 мм, называется крутизной характеристики измерительного преобразователя.

Дифференциально-трансформаторный преобразователь. Для измерения давлений и перепадов давлений при автоматизации парогенераторов применяются электрические манометры типа МЭД и дифференциальные манометры типа ДМ.

Чувствительным элементом манометра типа МЭД служит трубчатая манометрическая пружина.

В дифференциальном манометре типа ДМ (рис. 29,а) чувствительный элемент состоит из двух гофрированных мембранных коробок 1 и 2. Нижняя коробка помещена в полость дифманометра с большим давлением, верх-

няя — в полости с меньшим давлением. Внутренние полости коробок заполнены дистиллированной водой и сообщаются через отверстие.

При изменении перепада давлений, измеряемого дифференциальным манометром, вода перетекает из одной коробки в другую, а перемещения верхней коробки передаются плунжеру 3 дифференциально-трансформаторного преобразователя.

Для измерения незначительных давлений и разрежений применяются дифференциальные тягомеры типа ДТ-2. Чувствительным элементом этого прибора служит мембранная коробка, помещенная в герметичном корпусе прибора.

В манометрах МЭД, дифманометрах ДМ и дифтягомерах ДТ-2 измеряемый параметр преобразуется в электрический сигнал с помощью дифференциально-трансформаторного преобразователя.

Электрическая схема включения дифференциально-трансформаторного преобразователя приведена на рис. 29,б. Первичная обмотка I преобразователя питается от вторичной обмотки трансформатора Tp измерительного блока регулятора. Вторичная обмотка II преобразователя, состоящая из двух встречно включенных катушек, подключена к резистору R . При среднем положении плунжера напряжение во вторичной обмотке равно нулю. При смещении плунжера во вторичной обмотке преобразователя возникает напряжение и на резисторе R появится переменное напряжение U , величина которого зависит от хода плунжера, а фаза — от направления смещения. Напряжение характеризует величину и направление отклонения регулируемого параметра от заданного значения. Доля напряжения, снимаемого с резистора R , может регулироваться.

Конденсатор C служит для уменьшения угла сдвига фаз между напряжением питания и сигнальным напряжением преобразователя.

б) Измерительные преобразователи температуры

Температура воды, пара и газов измеряется с помощью термометров термоэлектрических (термопар) и электрических термометров сопротивления.

Термометр термоэлектрический (рис. 30) состоит из двух изолированных друг от друга термоэлектродов 1 и 2, помещенных в защитную гильзу.

В качестве термоэлектродов используются разнородные металлы или сплавы. Сваренные или спаянные вместе концы термоэлектродов называются горячим спаем 3, противоположные концы — холодным спаем.

При нагревании горячего спая возникает термоэлектродвижущая сила (термо-э.д.с.), величина которой практически прямо пропорциональна измеряемой температуре (см. рис. 5,а).

При автоматизации парогенераторов применяются в основном термоэлектрические термометры с чувствительными элементами из сплавов хромель и алюмель или хромель и конпель. Для уменьшения отрицательного влияния запаздывания используются малоинерционные термометры, горячий спай которых размещается в утонченной части гильзы. Например, для измерения температуры пара до 600°C при давлениях до 40 МПа применяются термометры (термопары) типа ТХА-081.

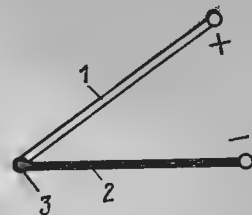


Рис. 30. Схема термоэлектрического термометра.

Нагревание термометра сопротивлением вызывает изменение электрического сопротивления чувствительного элемента, изготовленного из медной или платиновой проволоки. Медные термометры сопротивления применяются для измерения температуры среды до 100°C , платиновые — до 500°C . Чувствительный элемент электрического термометра сопротивления помещают сначала в тонкостенную трубку, а затем во внешнюю защитную гильзу.

10. ЭЛЕКТРОННЫЕ РЕГУЛИРУЮЩИЕ И КОРРЕКТИРУЮЩИЕ ПРИБОРЫ

Электронный регулирующий прибор серии РПИБ состоит из измерительного и электронного блоков, размещенных в общем корпусе. У различных типов регулирующих приборов этой серии применяется один и тот же электронный блок. Различаются приборы по типу установленного в них измерительного блока.

В регулирующем приборе РПИБ-III установлен измерительный блок для суммирования и компенсации не более трех сигналов, поступающих от индуктивных или

ставляющую напряжения. Постоянная составляющая напряжения выделяется на резисторе R_{75} .

Если сигнал на входе в усилитель отсутствует, то токи коллектора, протекающие по резистору нагрузки R_{75} , в каждый полупериод равны, но направлены противоположно. Поэтому постоянная составляющая напряжения на нагрузке равна нулю.

При появлении сигнала на входе усилителя ток коллектора в один полупериод увеличивается, а в другой — уменьшается. На нагрузке усилителя выделяется постоянная составляющая напряжения, пропорциональная разности токов коллектора в каждый полупериод. Полярность напряжения на выходе зависит от фазы входного сигнала, поэтому усилитель является фазочувствительным.

Для подавления пульсаций регулируемой величины в схеме предусмотрен демпфер, состоящий из резистора R_{76} , потенциометра R_{77} и емкости C_{52} .

Измерительный блок И-III-62 является унифицированным и применяется для регулирующих приборов типа РПИВ-III, а также в корректирующих приборах типа КПИ.

б) Измерительный блок постоянного тока

Измерительный блок постоянного тока типа И-Т-62 (рис. 32) состоит из измерительного устройства, магнитного и транзисторного усилителей.

В измерительном устройстве происходит компенсация термо-э.д.с. термометра термоэлектрического, подключаемого к измерительному устройству через коробку холодных спаев (типа КХС). В коробке холодных спаев размещен резистор R_m , предназначенный для автоматической компенсации термо-э.д.с. холодных спаев термометра при колебаниях температуры окружающего воздуха.

Сигнал постоянного тока, соответствующий заданному значению регулируемой температуры, снимается с вершин $в$ и $г$ моста. К вершинам $а$ и $б$ подведено стабилизированное напряжение от обмотки IV трансформатора $Tr1$, выпрямленное на диоде B_5 . Емкость C_{53} служит фильтром выпрямителя. Выпрямленное напряжение стабилизируется кремниевым диодом D_6 , включенным в мост, образованный резисторами R_{58} , R_{59} и R_{60} . Магнитный усилитель МУ питается от обмотки IV транс-

форматора $Tr1$ через стабилитроны D_4 и D_5 , формирующие пульсирующее напряжение прямоугольной формы.

Резисторы R_{65} , R'_{65} и корректор R_{66} предназначены для балансировки МУ. С помощью потенциометра R_{67} задается ток первичной обмотки усилителя.

Обмотка II МУ охватывает оба магнитопровода и совмещает функции сигнальной и вторичной обмоток.

Второй каскад усилителя собран на транзисторе T_1

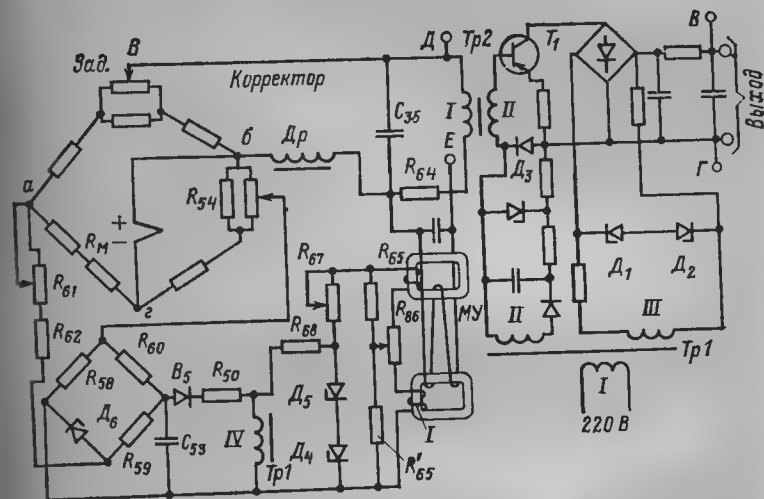


Рис. 32. Принципиальная электрическая схема измерительного блока И-Т-62.

по схеме, описанной выше при рассмотрении измерительного блока И-III-62. Отличие состоит лишь в том, что демпфер на выходе блока И-Т-62 не устанавливается, так как сигнал от термоэлектрического термометра не пульсирует.

При отклонении регулируемой температуры от заданного значения на резисторе R_{64} появится напряжение постоянного тока, соответствующее сигналу небаланса в измерительном устройстве. Это напряжение преобразуется и усиливается магнитным усилителем, с выхода которого сигнал поступает в транзисторный каскад усиления.

Измерительный блок И-Т-62 применяется в регулирующих приборах типа РПИВ-Т, а также в корректирующих приборах типа КПИ-Т.

в) Другие измерительные блоки

Кроме описанных, применяются измерительные блоки других типов. Измерительный блок типа И-IV-62 воспринимает сигналы от четырех приборов с дифференциально-трансформаторными, индуктивными или реостатными преобразователями.

Измерительный блок И-Т2-62 может воспринимать один сигнал постоянного тока от термоэлектрического термометра и до двух сигналов переменного напряжения от дифференциально-трансформаторных, индуктивных или реостатных преобразователей.

Измерительные блоки И-С-62 и И-2С-62 служат для работы с термометрами сопротивления. К блоку И-С-62 можно подключить один термометр сопротивления, к блоку И-2С-62 — два.

При применении в схеме регулятора сигнала по мощности электродвигателя преобразователь мощности подключается к измерительному блоку типа И-М-62.

г) Электронный блок регулирующего прибора РПИБ

В бесконтактных регулирующих приборах применяются электронные блоки типа РПИ. Блок предназначен для усиления сигнала постоянного тока, поступающего от измерительного устройства и электронного дифференциатора, управления пусковым устройством исполнительного механизма и формирования пропорционально-интегрального закона регулирования.

Электронный блок (рис. 33) включает в себя суммирующий каскад, модулятор, триггер, выходной каскад и устройство обратной связи вместе с трансформатором $Tr4$.

Суммирующий каскад выполнен на двойном триоде L_1 по схеме балансного усилителя постоянного тока. Оба триода L_1 питаются переменным напряжением от обмоток II и III трансформатора $Tr1$, включенных так, что проводящие полупериоды обоих триодов лампы совпадают. Источник сеточного смещения обоих триодов состоит из обмотки IV $Tr1$, диода D_1 , фильтрующего конденсатора C_2 и резистора R_2 .

Входной сигнал подается на сетку левого триода L_1 , работающего в режиме усиления напряжения постоянного тока. Правый триод L_1 работает в режиме катодного повторителя. Выходное напряжение суммирующего каскада снимается с конденсатора C_6 и подается в транзисторный модулятор.

Модулятор преобразует постоянное напряжение в прямоугольные разнополярные импульсы с частотой 50 Гц. Он собран на транзисторах T_1 и T_2 , работающих

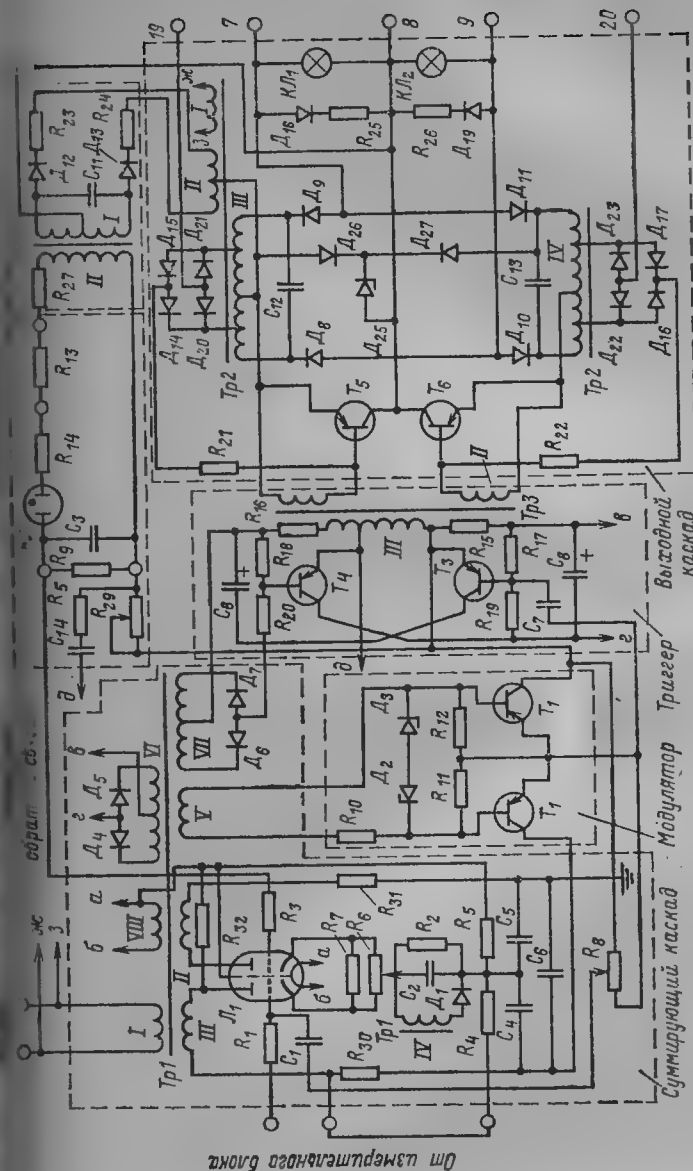


Рис. 33. Принципиальная электрическая схема электронного блока типа РПИ.

в ключевом режиме. Транзисторы модулятора питаются опорным напряжением, близким по форме к прямоугольному. Источником опорного напряжения служит обмотка *V* трансформатора *Tr1* и стабилитроны *D₂* и *D₃*. Опорное напряжение подается к транзисторам в противофазах, поэтому в любой момент времени один из транзисторов заперт.

Зона нечувствительности регулируется потенциометром *R₆*, являющимся нагрузкой модулятора. Модулятор и суммирующий каскад охвачены отрицательной обратной связью, подаваемой на левую сетку *Л₁* через емкость *C₁*. Благодаря этому выходной сигнал каскада не может превысить опорное напряжение модулятора. Прямоугольное напряжение с выхода модулятора через емкость *C₇* подается на вход триггера, собранного на транзисторах *T₃* и *T₄*.

Источники питания транзисторов состоят из обмоток *VI* и *VII* трансформатора *Tr1*, диодов *D₄—D₇* и емкостей *C₈*, *C₉*. Ток базы транзисторов задается делителями *R₁₇*, *R₁₉* и *R₁₈*, *R₂₀*.

Нагрузкой транзистора *T₃* служит обмотка *III* трансформатора *Tr3* и резистор *R₁₆*, а транзистора *T₄* — та же обмотка и резистор *R₁₅*. Ток базы транзистора *T₃* и коллектора *T₄* задается напряжением на емкости *C₈*, а ток базы *T₄* и коллектора *T₃* — напряжением на емкости *C₉*.

При открытом транзисторе *T₃* ток его коллектора создает на резисторе *R₁₆* и части обмотки *III* трансформатора *Tr3* напряжение, запирающее транзистор *T₄*.

При запертом транзисторе *T₃* управляющий сигнал, поданный на его базу через емкость *C₇*, отпирает транзистор *T₄* базовым током, создаваемым делителем *R₁₈*, *R₂₀*. При этом ток коллектора *T₄*, протекая через резистор *R₁₅*, запирает транзистор *T₃* даже после снятия управляющего сигнала с его базы. Это создает два устойчивых состояния триггера, одно из которых — транзистор *T₃* заперт, а транзистор *T₄* открыт — является предпочтительным благодаря введению переменной составляющей, задаваемой резистором *R₃₂* модулятора через емкость *C₆*.

При появлении на выходе модулятора сигнала триггер переходит из одного состояния в другое, причем фаза перехода определяется знаком выходного сигнала лампового каскада.

Прямоугольное напряжение, возникающее на обмотках *I* и *II* трансформатора *Tr3*, управляет транзисторами *T₅* и *T₆* выходного каскада. Запирающее напряжение транзисторов *T₅* и *T₆* формируется диодами *D₁₄—D₁₇* и резисторами *R₂₁* и *R₂₂*.

Нагрузка прибора по постоянному напряжению подключается к выводам 7, 8 и 9. Постоянное напряжение на выходе создается диодами *D₈—D₁₁*, переменное — диодами *D₂₀—D₂₃*.

Нагрузкой выходного каскада служит также обмотка *I* трансформатора обратной связи *Tr4*, получающая питание от трансформатора *Tr2* через диоды *D₁₂* и *D₁₃*. Устройство упругой обратной связи питается от обмотки *II* *Tr4*. Когда на выходе регулирующего блока появится сигнал, напряжение на обмотке *II* превышает напряжение зажигания неоновой лампы *НЛ*, конденсатор *C₃* заряжается и напряжение обратной связи *U_{о.с.}* через резистор *R₉* подводится к правой сетке *Л₁*. Скорость нарастания *U_{о.с.}* зависит от величины напряжения, снижаемого с потенциометра

R₁₄, емкости конденсатора *C₃* и величины резистора *R₉*. Полярность сигнала обратной связи *U_{о.с.}* обратна знаку входного сигнала суммирующего каскада. Поэтому нарастание сигнала *U_{о.с.}* приводит к восстановлению баланса суммирующего каскада. При отключении регулирующего блока и исчезновении выходного сигнала неоновая лампа не будет пропускать ток в противоположном направлении. Начинается разряд конденсатора только через резистор *R₉*. Скорость разряда определяется постоянной времени, равной *R₉C₃*.

Действие обратной связи иллюстрируется рис. 34. В момент *t₁* после включения регулирующего блока начинается повышение напряжения *U_{о.с.}* на конденсаторе *C₃*, которое характеризуется кривой 1. В момент *t₂* входное напряжение суммирующего каскада уравнивается сигналом *U_{о.с.}*, регулирующий блок отключается и

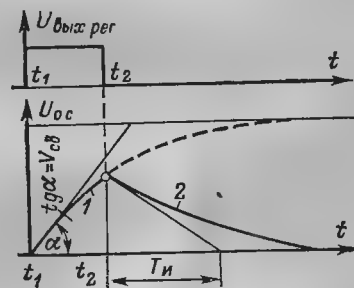


Рис. 34. Изменение сигнала обратной связи при включении и отключении регулирующего блока.

начинается разряд конденсатора. Процесс разряда изображен на графике линией 2. Время изодома $T_{из}$ характеризуется отрезком подкасательной. Величину его можно настроить подбором сменного резистора R_9 . Действие упругой обратной связи определяется скоростью нарастания напряжения $V_{св}$ на правой сетке L_1 в начальный момент зарядки конденсатора C_3 . Эта скорость задается потенциометром R_{14} и называется скоростью связи.

Потенциометр R_{28} служит для настройки времени включения регулятора.

д) Электронный корректирующий прибор типа КПИ

При автоматизации сложных объектов иногда применяется каскадное регулирование. В такой системе выходной сигнал одного из регуляторов изменяет задание одному или нескольким другим подчиненным регуляторам. Для этого обычно применяются бесконтактные корректирующие приборы типа КПИ, формирующие законы П, PI, или в сочетании с дифференциатором ПИД управления «подчиненными» регуляторами. К каждому корректирующему прибору может быть подключено до шести таких регуляторов.

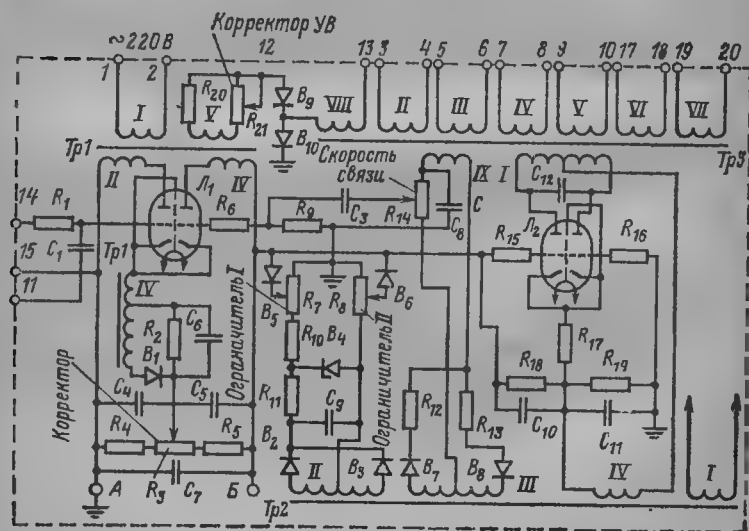


Рис. 35. Принципиальная электрическая схема электронного блока типа КПИ-62.

В состав корректирующего прибора входит один из унифицированных измерительных блоков (схемы которых рассмотрены выше) и электронный блок (рис. 35). Электронный блок имеет два каскада усиления, ограничитель и устройство обратной связи.

Первый каскад выполнен по балансной схеме усиления постоянного тока на двойном триоде L_1 . Знак выходного напряжения первого каскада зависит от знака входного сигнала, поэтому каскад обладает свойством фазочувствительности.

Оба триода L_1 питаются переменным напряжением от обмоток I и IV трансформатора $Tr1$, причем проводящие полупериоды обоих триодов совпадают по времени.

Напряжение сеточного смещения состоит из постоянной и переменной составляющих. Постоянная составляющая создается однополупериодным выпрямителем B_1 и фильтром, состоящим из резистора R_2 и емкости C_6 . Переменная составляющая снимается с части обмотки IV $Tr1$ и складывается с выпрямленным напряжением. Назначение переменной слагающей — исключить возникновение сеточных токов в нерабочие полупериоды лампы.

Сигнал от измерительного блока через защитный резистор R_1 поступает на сетку левого триода L_1 . Конденсатор C_1 служит для фильтрации переменной составляющей. Левый триод L_1 работает в режиме катодного повторителя, так как напряжение, развиваемое на его нагрузке, состоящей из резистора R_4 и части сопротивления потенциометра R_3 , суммируется с входным сигналом и подается на сетку.

На сетку правого триода подается напряжение с катодной нагрузки левого триода, а также сигнал от устройства упругой обратной связи. Правый триод работает в режиме обычного усилителя. Нагрузка его состоит из резистора R_6 и части сопротивления потенциометра R_3 . Емкости C_4 и C_5 служат для сглаживания пульсаций выходного напряжения.

Напряжение, усиленное первым каскадом, подается на вход второго каскада через ограничитель, предназначенный для ограничения верхнего и нижнего предельных значений выходного напряжения корректирующего прибора.

Действие ограничителя основано на шунтировании входной цепи первого каскада сопротивлением небольшой величины при повышении выходного напряжения до заданного предела. Для этого на выходе ограничителя включены два диода B_5 и B_6 , запертые напряжением от потенциометров R_7 и R_8 , получающих питание стабилизированным напряжением. Источник стабилизированного напряжения состоит из обмотки II трансформатора $Tr2$, диодов B_2 и B_3 , сглаживающего конденсатора C_9 и стабилизатора B_4 .

Пока выходное напряжение первого каскада ниже запирающего потенциала на диодах B_5 и B_6 , ограничитель работает практически в режиме холостого хода. При превышении выходным напряжением запирающего потенциала один из диодов отпирается и шунтирует нагрузку каскада. В этом случае каскад нагружен небольшим сопротивлением, равным сумме прямого сопротивления диода и части сопротивления потенциометра R_7 (или R_8) между движком и заземленной точкой. При этом ограничитель работает в режиме, близком к короткому замыканию, и выходное напряжение его практиче-

ски равно запирающему. Уровень ограничений задается установкой напряжений на диодах B_5 и B_8 с помощью потенциометров R_7 и R_8 .

Второй каскад (усилитель мощности) выполнен на двойном триоде L_2 . Входное напряжение подается на обе сетки L_2 через симметричный делитель, состоящий из резисторов R_{18} и R_{19} . Нагрузкой каскада служит обмотка I выходного трансформатора Tr_3 . Отрицательное смещение на сетках L_2 создается резистором R_{17} . Резисторы R_{15} и R_{16} ограничивают сеточные токи.

При отсутствии напряжения на входе каскада анодные токи триодов L_2 равны по величине, но направлены противоположно. Поэтому результирующий ток в нагрузке каскада равен нулю. Магнитный поток в сердечнике выходного трансформатора Tr_3 отсутствует, и напряжение на его выходных обмотках равно нулю.

При появлении напряжения на входе каскада смещение на одной из сеток уменьшается, а на другой увеличивается. Равенство анодных токов обоих триодов нарушается, и на вторичных обмотках Tr_3 появляется напряжение, величина и фаза которого определяют-ся величиной и полярностью входного сигнала.

Закон регулирования формируется устройством обратной связи, состоящим из потенциометра R_{14} (степень связи), емкости C_3 и сменного резистора R_9 (время изодрома). Устройство обратной связи питается напряжением от обмотки IX трансформатора Tr_3 через фазочувствительный выпрямитель, собранный на диодах B_7 и B_8 .

К выводам 12 и 13 может быть подключено до шести приборов — указателей выхода, позволяющих наблюдать за выходным сигналом. Источником питания указателей выхода служит однополупериодный фазочувствительный выпрямитель, собранный на диодах B_9 и B_{10} . Ток через диоды ограничивается резистором R_{20} .

е) Измерительный блок типа ИО4

Аппаратура серии «Каскад», в которую входит измерительный блок ИО4, построена по блочно-модульному принципу: каждый блок включает в себя ряд модулей. Модуль представляет собой унифицированный узел, выполняющий определенную функцию и конструктивно оформленный как самостоятельное изделие.

Измерительный блок ИО4 (рис. 36) состоит из шести модулей, узлов масштабирования и компенсации. Входные сигналы подаются на выводы 11—18. На вход измерительного блока может быть подключено до четырех унифицированных сигналов постоянного тока 0—5 мА.

Падение напряжения на резисторах $R_1—R_4$ используется в качестве входного сигнала для соответствующего модуля преобразователя МП-04. Напряжение, поступающее на вход МП-04, преобразовывается с помощью управляющего сигнала, поступающего от генератора МГ-2. Источником питания модуля генератора служит стабилитрон D_1 , включенный в мостовую схему, состоящую из резисторов R_{21} , R_{22} и R_{23} . Модуль преобразо-

вывает постоянное напряжение в переменное с частотой около 10 КГц.

Узел масштабирования включает в себя регулируемые резисторы $R_9—R_{12}$, с помощью которых можно регулировать долю каждого сигнала, поступившего на вход блока. Резисторы $R_5—R_8$ служат для подстройки. Сигналы, снимаемые с резисторов $R_9—R_{12}$, последовательно суммируются друг с другом и с напряжением, формируемым в узле компенсации.

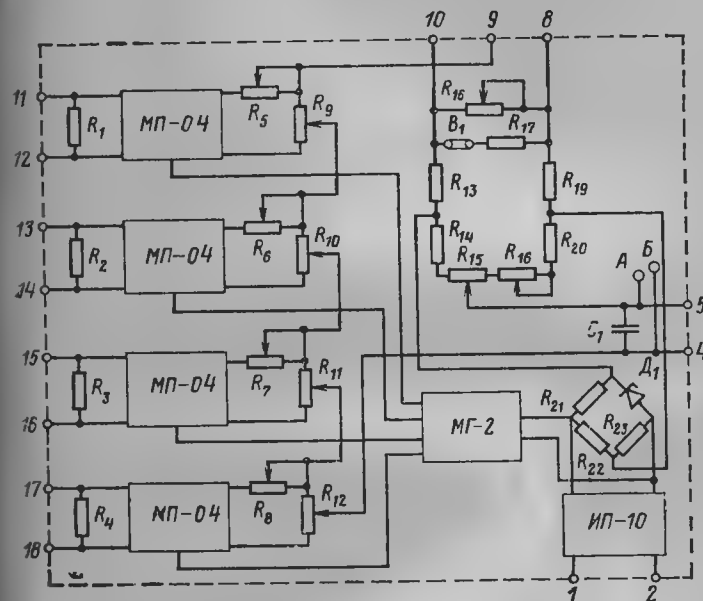


Рис. 36. Функциональная электрическая схема измерительного блока ИО4.

Узел компенсации состоит из моста, образованного резисторами R_{13} , R_{14} , R_{19} , R_{20} , потенциометрами R_{15} , R_{18} и потенциометрическим задатчиком, который подключается к выводам 8—10 блока. Диапазон действия задатчика может изменяться дискретно — подключением переключателем B_1 резистора R_{17} или плавно с помощью потенциометра R_{16} . Потенциометры R_{15} и R_{18} служат для балансировки моста компенсации.

Источником питания моста компенсации служит стабилитрон D_1 , включенный в мостовую схему, которая

питается от модуля ИП-10. Переменное напряжение, подаваемое на выводы 1, 2 модуля питания ИП-10, преобразовывается в постоянное напряжение 30 В.

При отклонении от заданного значения любого из сигналов, поданных на вход блока, изменяется суммарный сигнал, снимаемый с потенциометров масштабирования. В результате нарушается равновесие моста компенсации и с потенциометра R_{15} снимается напряжение, которое является выходным сигналом блока. Конденсатор C_1 служит для сглаживания пульсаций выходного сигнала, снимаемого с выводов 4, 5 блока. Величина выходного напряжения может изменяться в пределах $\pm 2,5$ В. Гнезда А и Б используются для контроля выходного напряжения.

ж) Блок регулирующий релейный типа Р21

В системе «Каскад» регулирующий релейный блок Р21 позволяет осуществлять ПИ или в сочетании с дифференциатором ПИД законы регулирования.

В схеме регулирующего блока (рис. 37) используются три модуля: усилитель постоянного тока УВ-41, усилитель релейный УР-2 и источник питания типа ИП-15.

На вход блока могут быть поданы унифицированные сигналы постоянного тока от измерительных преобразователей непосредственно, а также с выхода измерительного блока ИО4. Входные сигналы, поданные на выводы 14, 17, суммируются друг с другом, и суммарный сигнал поступает на демпфирующее устройство. Оно состоит из потенциометра R_4 , конденсатора C_1 и предназначено для сглаживания пульсаций сигнала, подаваемого на вход усилителя УВ-41.

Сигнал постоянного тока, поданный на выводы 17, 18, поступает на вход УВ-41 помимо демпфирующего устройства. На вход блока (выводы 19, 20) может быть подан сигнал динамической связи от другого регулирующего блока.

Усилитель УВ-41 охвачен отрицательной обратной связью, степень которой устанавливается потенциометрами R_{6a} и R_5 в зависимости от требуемой зоны нечувствительности. Выходной сигнал УВ-41 поступает на вход релейного усилителя УР-2 через фильтр, образованный резистором R_7 и конденсаторами C_5 и C_6 .

На выходе усилителя УР-2 формируется сигнал в виде напряжения постоянного тока. Усилитель имеет ре-

лейную характеристику, которая формируется двумя тиристорами, включенными на его выходе. Нагрузкой УР-2 служит пусковое устройство, подключаемое к выводам 7—9 блока. В качестве пускового устройства чаще всего используется тиристорный усилитель (см. § 13).

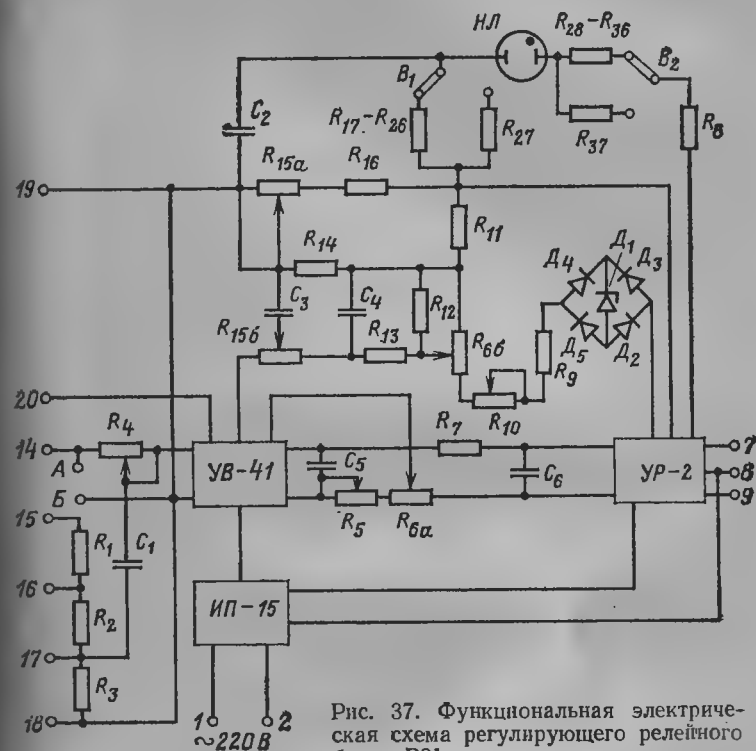


Рис. 37. Функциональная электрическая схема регулирующего релейного блока Р21.

С появлением сигнала на выводах 7, 8 или 9, 8 на выходе усилителя УР-2 возникает напряжение, которое подается в цепи главной и дополнительной обратной связи.

Цепь главной обратной связи состоит из резистора R_8 , неоновой лампы НЛ, конденсатора C_2 . Скорость заряда конденсатора C_2 определяется его емкостью, величиной сопротивлений резистора R_8 и резистора, подключаемого переключателем B_2 (скорости связи). Скорость разряда C_2 устанавливается переключателем B_1 (постоянная времени интегрирования).

В цепь дополнительной обратной связи включен мост, собранный на диодах $D_2—D_5$. В диагональ моста включен стабилитрон D_1 . Действие дополнительной обратной связи определяется скоростью заряда конденсатора C_3 . Эта скорость зависит от емкости C_3 и напряжения, снимаемого с делителя, образованного резисторами R_{11} , R_9 и потенциометрами R_{86} и R_{10} . Постоянная времени разряда C_3 определяется положением движка потенциометра R_{156} . Тем самым устанавливается длительность включения блока.

Сигналы главной и дополнительной обратной связи подаются на вход усилителя $УВ-41$.

Усилители $УВ-41$ и $УР-2$ питаются от источника питания $ИП-15$.

11. ЭЛЕКТРОННЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

В системах автоматического регулирования используются электронные приборы, с помощью которых формируется воздействие по скорости изменения регулируемого параметра, а также выполняются сравнение, суммирование и размножение сигналов. К таким приборам относятся электронные дифференциаторы, переключатели, сумматоры, размножители и др.

а) Электронные дифференцирующие приборы

Электронный дифференциатор предназначен для формирования сигнала по скорости изменения регулируемого параметра. Для работы с регулирующими приборами серии РПИБ выпускаются дифференциаторы двух типов: ДЛ-П — ламповый дифференциатор для работы с преобразователем переменного тока и ДЛ-Т — ламповый дифференциатор для работы с преобразователем постоянного тока.

Принципиальная электрическая схема дифференциатора типа ДЛ-П изображена на рис. 38. Дифференциатор состоит из измерительного устройства, транзисторного и лампового усилителей.

Измерительное устройство рассчитано для суммирования и компенсации сигналов, поступающих от двух преобразователей: дифференциально-трансформаторного, индуктивного или реостатного типа.

Измерительные преобразователи питаются от обмотки IX трансформатора $Tr1$. Величина сигнала, снимаемого с одного из преобразователей, может регулироваться потенциометром R_{82} . Напряжения,

снимаемые с резисторов R_{82} и R_{83} , суммируются с учетом направления отклонения плунжера каждого преобразователя. Выходное напряжение измерительного блока через трансформатор $Tr2$ подается на вход транзистора $T1$.

Транзистор включен по схеме с общим эмиттером. С диода B_2 снимается напряжение смещения, задающее рабочую точку транзистора. Напряжение, питающее диод B_2 , подается от обмотки

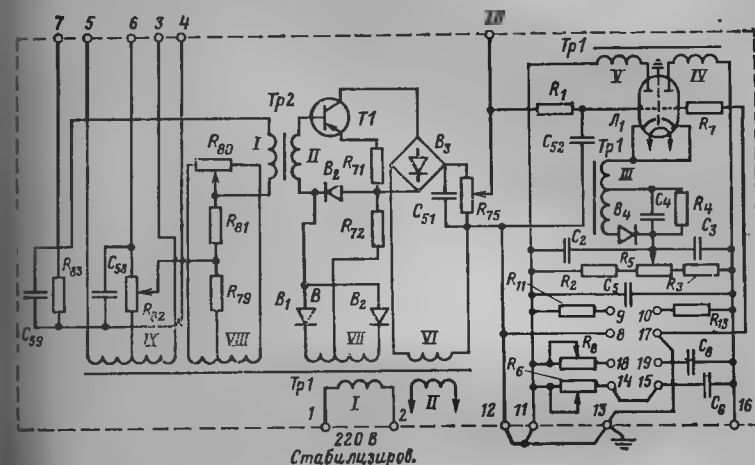


Рис. 38. Принципиальная электрическая схема дифференциатора типа ДЛ-П.

VII трансформатора $Tr1$ через выпрямитель, состоящий из двух диодов B_1 , и ограничивающий резистор R_{72} . Ток нагрузки транзистора создается на выпрямителе B_3 , получающем питание от обмотки VI $Tr1$.

При подаче на вход усилителя сигнала ток коллектора, протекающий через емкость C_{51} , в один полупериод увеличивается, в другой — уменьшается. С потенциометра R_{75} снимается постоянная составляющая выходного напряжения, подаваемая через фильтр R_1 , C_{52} на вход лампового усилителя.

Ламповый усилитель дифференциатора выполнен по схеме, аналогичной первому каскаду усиления электронного блока КПИ. Резисторы R_{11} и R_{18} предназначены для ввода в усилитель положительной обратной связи.

На выходе усилителя включена дифференцирующая цепочка $R_6—C_6$. Основным параметром настройки прибора является постоянная времени дифференцирования $T_d = R_6 C_6$, задаваемая потенциометром R_6 .

Существует несколько вариантов включения дифференциатора. При нормальном включении прибора дифференцированный выходной сигнал снимается с выводов 11 и 14, а выводы 11, 12, 11—17 и 14, 15 закорачиваются. При таком включении выходное напряжение

прибора приблизительно пропорционально скорости изменения входного сигнала.

Постоянная времени дифференцирования T_d при настройке может изменяться от 0 до 30 с. Для увеличения постоянной времени дифференцирования на сетку правого триода через вывод 17 может быть введена полная или частичная отрицательная обратная связь с выхода прибора.

Дифференциатор типа ДЛ-Т состоит из измерительного устройства, магнитного усилителя, транзисторного и лампового усилителей.

Измерительное устройство и магнитный усилитель выполнены по такой же схеме, как и в измерительном блоке типа И-Т-62. Схема транзисторного усилителя и схема лампового усилителя такие же, как и у дифференциатора ДЛ-П.

б) Переключатель типа ПЛК-П

Переключатель типа ПЛК-П применяется в качестве следящего прибора для обеспечения совпадающего по фазе (синфазного) перемещения сервоприводов двух исполнительных механизмов. Принципиальная электрическая схема переключателя приведена на рис. 39. Прибор состоит из измерительного устройства, транзисторного и лампового усилителей.

К измерительному устройству переключателя может быть подключено два дифференциально-трансформаторных или индуктивных преобразователя.

Схемы измерительных устройств переключателя ПЛК-П и дифференциатора ДЛ-П различаются лишь тем, что в измерительном устройстве ПЛК-П доля сигнала, снимаемого с каждого из преобразователей, может регулироваться потенциометрами R_{82} и R_{83} .

Величина напряжения, снимаемого с потенциометров, подводится к обмотке I трансформатора $Tr2$, связывающего измерительное устройство с транзисторным усилителем.

Транзисторный усилитель выполнен по такой же схеме, как и в измерительном блоке типа И-П-62. Выходной сигнал усилителя через демпфер, состоящий из потенциометра R_8 и емкости C_3 , подается на левую сетку двойного триода Π_1 лампового усилителя. Левый триод Π_1 работает по схеме усилителя напряжения. Режим работы этого усилителя задается отрицательным сеточным смещением, снимаемым с потенциометра R_3 .

Источником напряжения сеточного смещения служит обмотка V трансформатора $Tr1$. Резистор R_2 ограничивает верхний предел отрицательного сеточного смещения. Нагрузка левого триода состоит из резистора R_4 , шунтированного емкостью C_1 .

Правый триод Π_1 работает как усилитель мощности. Сеточное смещение правого триода (в нерабочий период левого триода) со-

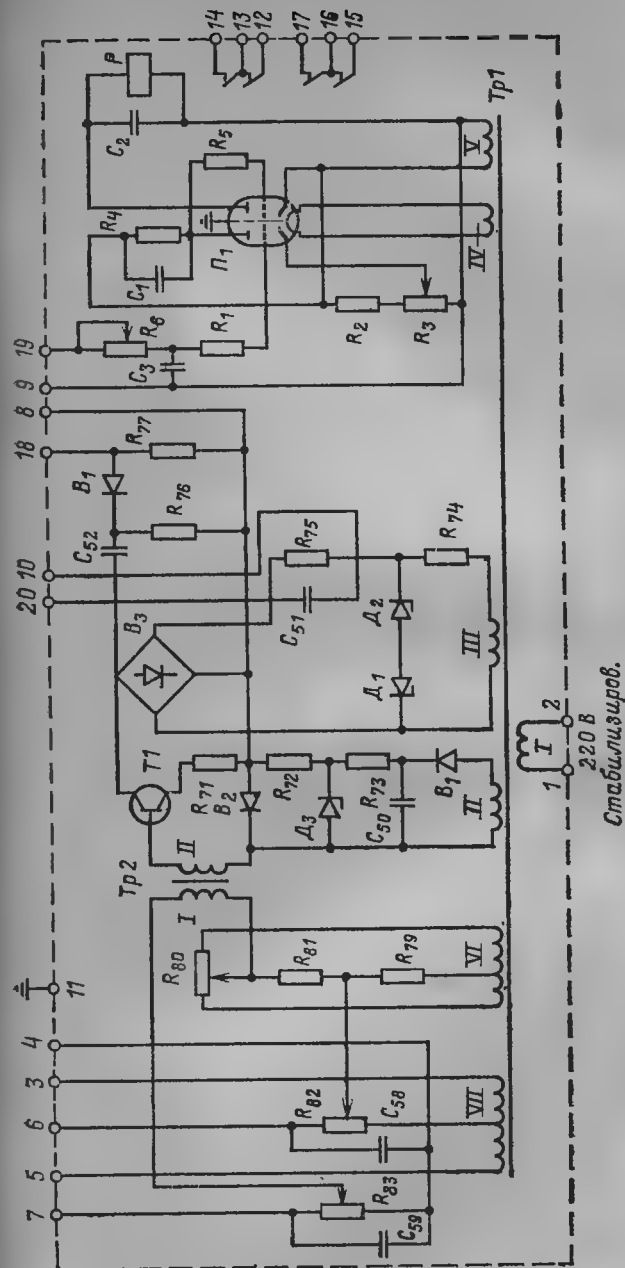


Рис. 39. Принципиальная электрическая схема переключателя типа ПЛК-П.

здается напряжением на емкости C_1 . Резисторы R_1 и R_3 ограничивают сеточные токи.

Оба триода L_1 питаются напряжением от обмотки V трансформатора $Tr1$. Нагрузкой лампового усилителя служит обмотка электромагнитного реле P , шунтированная емкостью C_2 .

При отсутствии входного сигнала потенциометром R_3 устанавливают в левом триоде ток, при котором падение напряжения на резисторе R_4 достаточно для запирающего правого триода.

При подаче входного сигнала анодный ток левого триода снижается, а отрицательное смещение правого триода уменьшается. Анодный ток правого триода увеличивается, и реле P срабатывает. При этом контакты 12 и 13, 15 и 16 реле размыкаются, а контакты 13 и 14, 16 и 17 — замыкаются. Эти контакты используются в цепях управления двух исполнительных механизмов, перемещение которых должно быть синфазным.

в) Устройство динамической связи

Устройство динамической связи типа КДС применяется в схемах автоматического регулирования парогенераторов для связи между ведущим и ведомым регуляторами. Как видно из принципиальной схемы (рис. 40), это устройство представляет собой RC -цепочку. Потен-

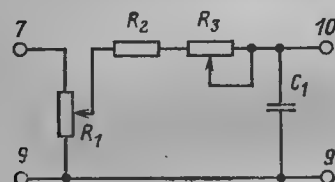


Рис. 40. Принципиальная электрическая схема устройства динамической связи типа КДС.

циометр R_1 служит для настройки степени связи между регуляторами, а резистор R_3 — для установки постоянной времени.

К входным зажимам 7 и 9 устройства динамической связи подключается выходной сигнал ведущего регулятора. Выходной сигнал устройства, снимаемый с зажимов 9 и 10, подается на вход ведомого регулятора.

12. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МЕХАНИЗМЫ

Для перемещения регулирующего органа в системах автоматического регулирования и дистанционного управления в основном применяются механизмы электрические однооборотные (МЭО).

Московский завод тепловой автоматики (МЗТА) выпускает электрические исполнительные механизмы серий МЭО-Б и МЭО-К. Исполнительные механизмы серии

МЭО-Б применяются в системах бесконтактного управления, МЭО-К — в системах контактного управления.

Чебоксарский завод электрических исполнительных механизмов (ЧЗЭИМ) выпускает исполнительные механизмы серии МЭО, преимущественно применяемые в системах бесконтактного управления, и механизмы серии МЭО-К для систем контактного управления.

а) Исполнительные механизмы МЗТА

Исполнительный механизм типа МЭОБ состоит из электрического сервопривода и блока сервомотора. Электромеханический сервопривод представляет собой двухступенчатый редуктор, приводимый во вращение асинхронным электродвигателем с короткозамкнутым ротором. Параллельно обмоткам электродвигателя подключается электрический тормоз. На выходном валу сервопривода крепятся рычаг для сочленения с регулирующим органом и профилированный кулачок для сочленения с выключающей тягой. Сервоприводы выпускаются с крутящим моментом на выводном валу 245 и 618 Н·м и временем полного оборота выходного вала 100 с.

Каждый из сервоприводов допускает местное ручное управление с помощью маховика.

Блок сервомотора типа БС-2 (рис. 41) выполнен в виде колонки, которая устанавливается на сервоприводе. Внутри корпуса колонки смонтированы конечные 1 и путевые 2 выключатели, потенциометрический преобразователь 3 для индикатора положения и рычаг 4, связанный с выключающей тягой 5. Сверху корпуса размещен дифференциально-трансформаторный преобразователь 6.

Перемещение выходного вала сервопривода передается через выключающую тягу движку 7 потенциометрического преобразователя и одновременно через систему

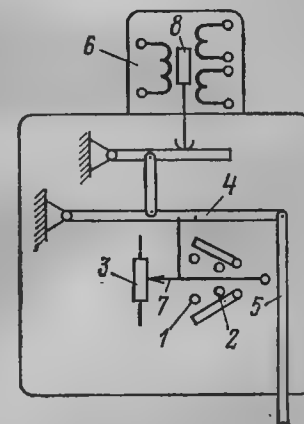


Рис. 41. Конструктивная схема блока сервомотора БС-2.

рычагов плунжеру 8 дифференциально-трансформаторного преобразователя, предназначенного для получения сигнала переменного тока, пропорционального перемещению выходного вала сервопривода. Конечные выключатели ограничивают крайние положения выходного вала сервопривода при дистанционном управлении. Путьевые выключатели выполняют ту же задачу при автоматическом управлении сервоприводом.

Применяются также блоки сервомотора типа БС-1, у которых отсутствует дифференциально-трансформаторный преобразователь.

Для уменьшения выбега электродвигателя у исполнительного механизма МЭОБ используется электромагнитный тормоз, который вступает в действие при отключении электродвигателя. Для этой же цели у исполнительного механизма МЭОК используется конденсаторный электротормоз. Этот тормоз вмонтирован в пусковое устройство и подключается к обмоткам электродвигателя в момент отключения исполнительного механизма.

б) Электрические исполнительные механизмы ЧЗЭИМ

Чебоксарским заводом электрических исполнительных механизмов (ЧЗЭИМ) выпускаются модификации однооборотных исполнительных механизмов типа МЭО и МЭО-К с крутящим моментом на выходном валу 39, 98, 245, 618, 1570, 3920 и 9800 Н·м и временем полного оборота вала 40, 100 и 250 с.

Исполнительный механизм типа МЭО состоит из многоступенчатого редуктора, приводимого во вращение двухфазным асинхронным электродвигателем, электромагнитного тормоза и блока преобразователей.

Статор электродвигателя состоит из двух обмоток: возбуждения *ОВ* и управления *ОУ* (рис. 42). Обмотка возбуждения питается непосредственно от сети переменного тока напряжением 220 В. Обмотка управления получает питание от магнитного усилителя. Одновременно с ней получает питание электромагнитный тормоз *ЭМ*, включенный параллельно обмотке управления. Для сдвига фаз в цепь обмотки возбуждения включен конденсатор *С*.

Блок преобразователей состоит из четырех выключателей B_1 — B_4 и двух индуктивных преобразователей $ДИ_1$

и $ДИ_2$. Два выключателя могут использоваться в качестве конечных, а два — в качестве путевых. Каждый индуктивный преобразователь связан с выходным валом исполнительного механизма. Один из преобразователей используется для указателя положения, другой — в цепи обратной связи.

Исполнительные механизмы МЭО допускают работу в стопорном режиме, при котором механически ограничивается перемещение выходного вала без отключения электродвигателя. Возможность работы в таком режиме обеспечивается благодаря тому, что ротор электродвигателя выполнен в виде тонкостенного алюминиевого цилиндра.

Для управления исполнительным механизмом типа МЭО может использоваться магнитный усилитель (бесконтактное управление) либо реверсивный магнитный пускатель (контактное управление).

Ручное управление исполнительным механизмом осуществляется с помощью маховика.

Отличительная особенность исполнительного механизма серии МЭО-К состоит в том, что он оснащен трехфазным асинхронным электродвигателем, управляемым с помощью реверсивного магнитного пускателя.

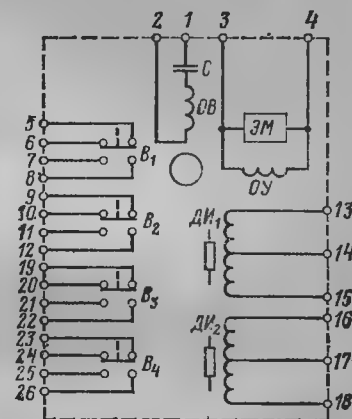


Рис. 42. Принципиальная электрическая схема исполнительного механизма типа МЭО.

13. ПУСКОВЫЕ УСТРОЙСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ

Пусковые устройства применяются для управления электрическими исполнительными механизмами. Существуют контактные и бесконтактные системы управления. В контактной системе управления в качестве пускового устройства применяется реверсивный магнитный пускатель. В бесконтактных системах управления для этой же цели применяются тиристорные и магнитные усилители.

а) Пускатель магнитный реверсивный
типа ПМРТ

Пуcкатель магнитный реверсивный типа ПМРТ применяется для управления трехфазным асинхронным электродвигателем переменного тока мощностью до 1 кВт и напряжением 220/380 В.

Пускатель состоит из двух контакторов и электрического конденсаторного тормоза, смонтированных в об-

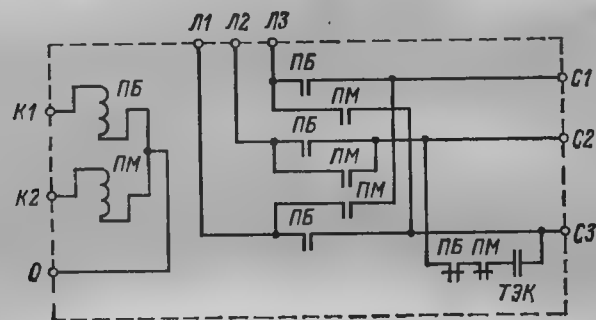


Рис. 43. Принципиальная электрическая схема пускателя магнитного реверсивного типа ПМРТ.

щем корпусе. Каждый контактор имеет три замыкающих силовых контакта и вспомогательные блок-контакты.

Обмотки *ПБ* и *ПМ* (рис. 43) питаются переменным током 220 В при дистанционном управлении и постоянным током 27 В от автоматического регулятора. При подаче напряжения, например, на обмотку *ПБ* замыкаются силовые контакты и с выводов *С1*, *С2*, *С3* пускателя напряжение поступает в обмотку статора. Электродвигатель начинает вращаться в сторону открытия регулирующего органа (в сторону «больше»). Подача напряжения на обмотку *ПМ* вызовет включение электродвигателя в противоположную сторону (в сторону «меньше»).

Конденсаторный тормоз ТЭК служит для уменьшения выбега электродвигателя при отключении.

б) Тиристорный усилитель типа У-101

Тиристорный усилитель типа У-101 является бесконтактным пусковым устройством и применяется для управления трехфазным асинхронным электродвигате-

лем переменного тока мощностью не более 1,1 кВт. Усилитель выполнен в виде блока, состоящего из семи модулей: модуля блокинг-генераторов, четырех тиристорных ключей, модуля питания и модуля защиты.

Функциональная электрическая схема тиристорного усилителя показана на рис. 44. Блокнг-генератор собран на двух полупроводниковых триодах $Tn1$ и $Tn2$, получающих питание от трансформаторов $Tr1$ и $Tr2$.

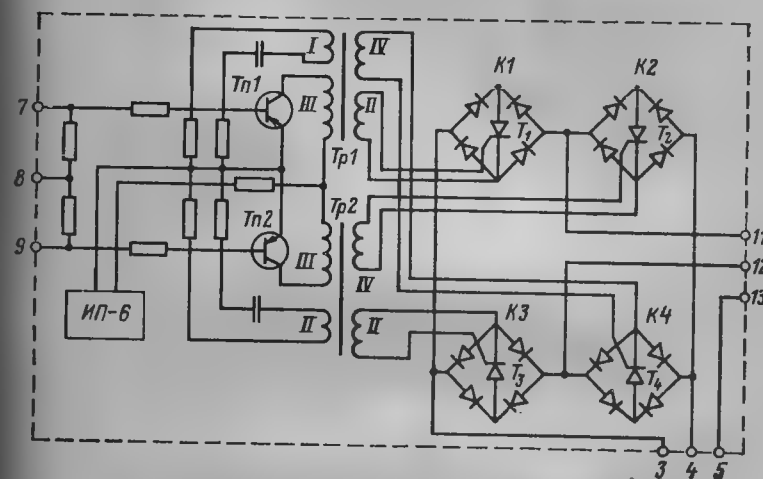


Рис. 44. Функциональная электрическая схема тиристорного усилителя типа У-101.

Трансформаторы питаются от источника питания ИП-6.

Ключ $K1$ состоит из мостикового выпрямителя, собранного на четырех диодах. В одну из диагоналей моста включен тиристор T_1 , к управляющему электроду которого подводится напряжение от обмотки II трансформатора $Tr1$. К другой диагонали моста подводится напряжение одной из фаз сети переменного тока, подключенного к выводам $3-5$. Аналогично выполнены остальные ключи.

Модуль защиты (на схеме не показан) предназначен для защиты от коротких замыканий.

На входные выводы 7—9 тиристорного усилителя подается напряжение постоянного тока с выхода электронного регулирующего прибора. В зависимости от знака входного напряжения включается один из блокинг-гене-

раторов, например $Tn1$. Блокинг-генератор работает с частотой 3 кГц и открывает тиристоры T_1 и T_4 в самом начале периода. При этом коммутируются две фазы переменного тока, подключенные к выводам 3, 4 усилителя, и с его выхода подается напряжение в статорные обмотки электродвигателя исполнительного механизма. Фаза, присоединенная к выводу 5, подводится к электродвигателю помимо ключей.

При перемене полярности сигнала на входе в усилитель включится блокинг-генератор $Tn2$ и откроются тиристоры T_2 и T_3 . Электродвигатель начнет вращаться в противоположную сторону. Таким образом, электродвигатель исполнительного механизма, управляемый тиристорным усилителем, вращается в направлении, соответствующем полярности входного сигнала, поступающего от регулирующего прибора.

в) Магнитный усилитель серии УМД

Магнитный усилитель предназначен для бесконтактного управления двухфазным конденсаторным асинхронным электродвигателем.

На рис. 45 показана принципиальная электрическая схема маг-

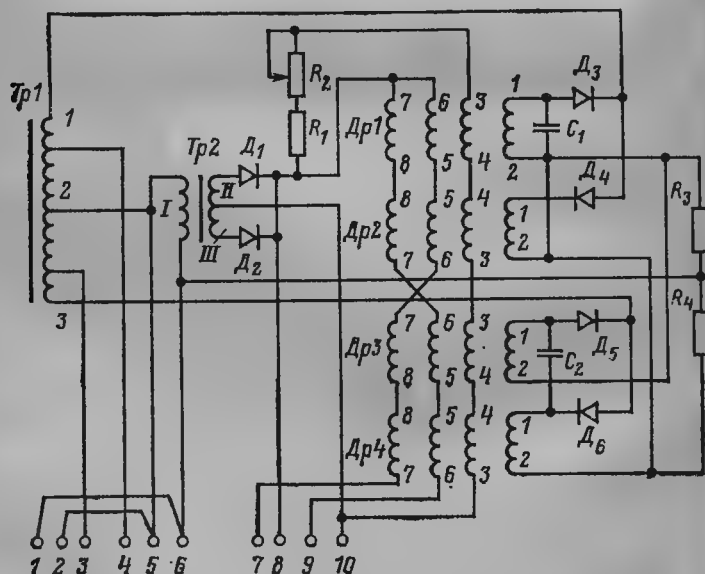


Рис. 45. Принципиальная электрическая схема магнитного усилителя серии УМД.

нитного усилителя серии УМД. Усилитель состоит из четырех дросселей насыщения $Др1—Др4$, включенных по дифференциальной схеме. На каждом дросселе имеются четыре обмотки: рабочая обмотка 1, 2, обмотка смещения 3, 4 и две обмотки управления: 5, 6 и 7, 8. Обмотки смещения включены последовательно и питаются от выпрямителя, состоящего из обмоток II и III трансформатора $Tr2$ и диодов $Д1$ и $Д2$. Последовательно с рабочими обмотками включены диоды $Д3—Д6$ таким образом, что если через дроссель $Др1$ (или $Др3$) ток проходит в один полупериод, то через дроссель $Др2$ (или $Др4$) — во второй полупериод. Обмотки управления питаются постоянным током, поступающим от регулирующего прибора на выводы 7, 8 или 8, 9 магнитного усилителя.

Усилитель питается от сети переменного тока напряжением 220 В, которое подается на выводы 1, 2.

При отсутствии напряжения на входе усилителя через обмотки 1, 2 и 2, 3 автотрансформатора $Tr1$ протекают одинаковые по амплитуде и совпадающие по фазе токи. Выходное напряжение на выводах 3, 4 равно нулю.

С подачей входного сигнала на выводы 7, 8 под напряжение включаются управляющие обмотки дросселей $Др1$ и $Др2$, вследствие чего индуктивное сопротивление рабочих обмоток этих дросселей резко снижается. Напряжение переменного тока с выводов 3, 4 подается на управляющую обмотку электродвигателя. Обмотка возбуждения электродвигателя включается в сеть через выводы 5, 6 усилителя.

С возникновением входного сигнала на выводах 8, 9 начнут работать дроссели $Др3$ и $Др4$. При этом меняется фаза выходного напряжения, и электродвигатель вращается в противоположном направлении.

14. УСТРОЙСТВА ДЛЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПОДАЧИ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ В ТОПКУ

Подача угольной пыли в топку парогенератора регулируется изменением частоты вращения питателей пыли, оснащенных электродвигателями постоянного тока с параллельным возбуждением. Электродвигатели такого же типа устанавливаются и на питателях сырого угля. Частота вращения электродвигателей параллельного возбуждения может регулироваться изменением тока в обмотке возбуждения или изменением напряжения в якоре.

Для регулирования частоты вращения изменением тока в обмотке возбуждения применяется устройство, получившее название станции регулирования подачи пылевидного топлива (СПП). Второй способ регулирования — изменением напряжения в якоре — осуществляется с помощью систем автоматического управления и бесступенчатого регулирования частоты вращения пылепитателей (система АР-ПП), а также питателей сырого угля (система АР-СП).

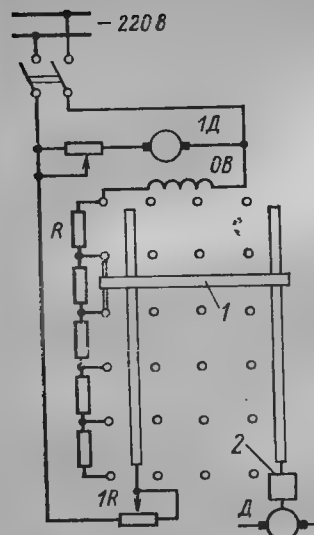


Рис. 46. Принципиальная электрическая схема регулирования частоты вращения пылепитателей с помощью станции типа СПП.

а) Станция регулирования подачи пылевидного топлива

На рис. 46 приведена принципиальная электрическая схема регулирования частоты вращения пылепитателей с помощью станции типа СПП.

Последовательно с обмоткой возбуждения OB электродвигателя пылепитателя $1Д$ включен регулировочный реостат R станции и реостат ручного управления $1R$. Сопротивление регулировочного реостата изменяется ступенчато при перемещении траверсы 1 , осуществляемом электродвигателем $Д$ с помощью редуктора 2 . Чтобы обеспечить одновременное и одинаковое изменение частоты вращения всех пылепитателей парогенератора, регулировочные реостаты выполнены в виде плоского контроллера с общей траверсой.

Электродвигатель $Д$ может управляться автоматически регулятором или же дистанционно обслуживающим персоналом. При полностью введенном сопротивлении реостатов пылепитатели вращаются с наибольшей скоростью, при выведенном — с наименьшей. Диапазон регулирования составляет от 450 до 1350 об/мин.

б) Система бесступенчатого регулирования подачи пылевидного топлива

Система бесступенчатого регулирования пылепитателей типа АР-ПП (рис. 47) состоит из блоков регулирования $БРИ-24$, $БРИ-23$ и преобразователя дроссельного $ПД$.

Входной сигнал, поступающий от электронного регулирующего прибора или от ключа дистанционного управления, подается к блоку $БРИ-24$ на выводы 7, 8 или 8, 9 и воспринимается одной из управляющих обмоток магнитных усилителей $1МУ$ или $2МУ$. Выходные обмотки магнитных усилителей соединены в мостовую схему, которая питается напряжением 127 В, подаваемым в диагональ моста. В другую диагональ этого моста включена обмотка управления OU электродвигателя $Д$, размещенного в блоке $БРИ-23$. Обмотка возбуждения OB этого двигателя питается напряжением 127 В через фазосдвигающий конденсатор C .

Вал двигателя $Д$ через редуктор P соединен с ротором сельсина-датчика CD . Угол поворота ротора сельсина ограничен диапазоном $0-45^\circ$. Положению 0° соответствует наименьшая частота вращения электродвигателей пылепитателей, положению 45° — наибольшая. С ротором сельсина связан плунжер индуктивного пре-

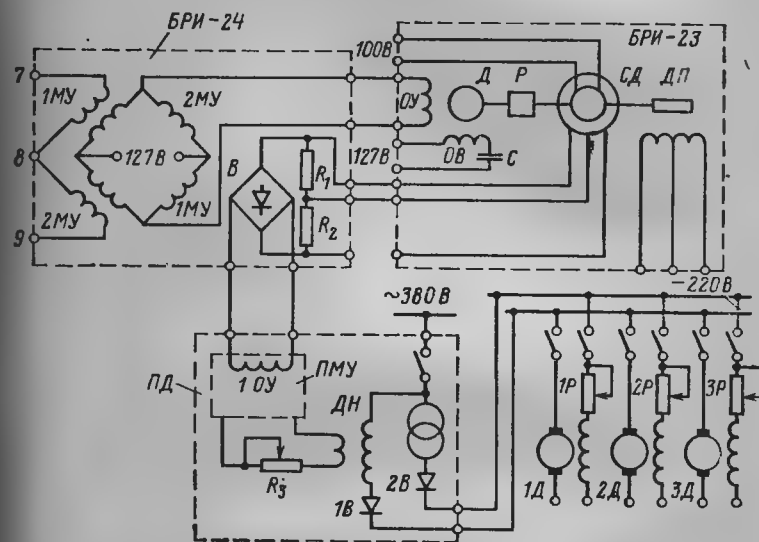


Рис. 47. Функциональная схема системы бесступенчатого регулирования пылепитателей.

образователя $ДП$. Выходной сигнал преобразователя пропорционален частоте вращения пылепитателей, поэтому он используется для индикатора, характеризующего работу системы.

В цепь обмоток статора сельсина включены резисторы R_1 и R_2 , падение напряжения на которых подводится к выпрямителю B . Выпрямленное напряжение подается на обмотку управления $1OU$ промежуточного магнитного усилителя $ПМУ$, расположенного в преобразователе дроссельном $ПД$. Промежуточный магнитный усилитель суммирует и усиливает поступающие в него сигналы и через потенциометр R_3 дает ток в управляющую обмотку дросселя насыщения $ДН$.

Напряжение, снимаемое с нагрузочной обмотки дросселя, подается на выпрямитель *1В*. Выпрямленным напряжением питаются якоря электродвигателей пылепитателей *1Д—3Д*. Обмотки возбуждения этих двигателей питаются постоянным током от выпрямителя *2В*. Реостаты *1Р—3Р* служат для ручной подрегулировки частоты вращения каждого пылепитателя.

Рассмотренный дроссельный преобразователь обеспечивает одновременное регулирование не более трех электродвигателей пылепитателей. В зависимости от количества пылепитателей, обслуживающих парогенератор, в систему бесступенчатого регулирования может входить несколько таких преобразователей.

При подаче на вход *БРИ-24* сигнала нарушается равновесие моста, образованного выходными обмотками *1МУ* и *2МУ*. На выходе моста появляется напряжение, пропорциональное входному сигналу. Это напряжение поступает в управляющую обмотку двигателя *Д*, и он начинает вращаться. Направление вращения зависит от того, в какой из магнитных усилителей (*1МУ* или *2МУ*) поступил входной сигнал.

По мере вращения двигателя *Д* поворачивается ротор сельсина. Напряжение на выходе сельсина изменяется пропорционально отклонению ротора от заданного значения. Это вызывает изменение токов на нагрузочных резисторах. Соответственно изменяется и напряжение, снимаемое с выпрямителя *В* и подаваемое на управляющую обмотку промежуточного магнитного усилителя. Тем самым меняется выходной сигнал усилителя, поступающий в управляющую обмотку дросселя насыщения. Это приводит к изменению напряжения, снимаемого с выпрямителя *1В* и подаваемого в обмотки якорей электродвигателей пылепитателей. В итоге изменяется частота вращения пылепитателей, а следовательно, и подача пыли в горелки парогенератора.

При подаче на вход *БРИ-24* сигнала обратной полярности система действует в описанной выше последовательности. Однако при этом частота вращения пылепитателей изменяется в противоположном направлении.

Система регулирует частоту вращения электродвигателей пылепитателей в диапазоне от 300 до 1500 об/мин.

Основное отличие систем *АР-СП* и *АР-ПП* состоит в том, что дроссельный преобразователь *АР-СП* питает лишь один электродвигатель пылепитателя сырого угля.

Контрольные вопросы

1. Поясните устройство дифманометра.
2. Как работает преобразователь, включенный по дифференциально-трансформаторной схеме?
3. В чем различие между термометром термоэлектрическим и термометром сопротивления?
4. Поясните принцип действия измерительного блока переменного тока.
5. Как усиливается сигнал в измерительном блоке постоянного тока?
6. Поясните назначение отдельных узлов электронного блока *РПИ*, пользуясь схемой, изображенной на рис. 33.
7. Назовите основные узлы электронного корректирующего прибора *КПИ*.
8. Поясните принцип действия электронного дифференциатора.
9. В чем различие электронных дифференциаторов *ДЛ-П* и *ДЛ-Т*?
10. Поясните принцип действия переключателя *ПЛК-П*.
11. Для чего служит устройство динамической связи?
12. Как устроен исполнительный механизм серии *МЭО*?
13. Каково назначение магнитного пускателя?
14. Как используется тиристорный усилитель в схеме управления исполнительным механизмом?
15. Опишите назначение и принцип действия магнитного усилителя.
16. Как регулируется частота вращения пылепитателей системой бесступенчатого регулирования?

Глава третья

АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ПИТАНИЯ И НЕПРЕРЫВНОЙ ПРОДУВКИ БАРАБАННЫХ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ

15. СВОЙСТВА ПАРОГЕНЕРАТОРА КАК ОБЪЕКТА РЕГУЛИРОВАНИЯ УРОВНЯ

Условия безопасной и надежной работы парогенератора и турбины требуют, чтобы уровень в барабане поддерживался в определенных пределах.

Повышение уровня за верхний допустимый предел (перепитка парогенератора) может привести к постепенному заносу солями пароперегревателя и выбросу влаги из котла, что может явиться причиной повреждения турбины. Снижение уровня за нижний предел (упуск воды из барабана) приводит к нарушению циркуляции в топочных экранах и пережогу труб. Этим объясняется,

что к надежности регулирования питания предъявляются повышенные требования.

Уровень в барабане изменяется из-за увеличения или уменьшения расхода пара или поступления воды в парогенератор, изменения тепловой нагрузки топки и давления в барабане.

а) Влияние на уровень тепловой нагрузки топки и давления в барабане

С колебаниями паровой нагрузки парогенератора изменяется и тепловая нагрузка топки, что оказывает влияние на уровень воды в барабане. Уменьшение тепловой нагрузки топки приводит к понижению уровня, а при увеличении нагрузки уровень повышается. Такое поведение уровня объясняется изменением объема пароводяной смеси, заполняющей часть барабана (ниже зеркала испарения) и трубы топочного экрана парогенератора.

Например, при уменьшении тепловой нагрузки топки количество тепла, воспринимаемое поверхностями нагрева, уменьшается, следовательно, снижается интенсивность парообразования. При этом уменьшается объем пароводяной смеси. В результате уровень в барабане снижается при сохранении равенства подачи воды в парогенератор и расхода пара из него.

При повышении тепловой нагрузки топки объем пароводяной смеси увеличивается, что вызывает повышение уровня.

Отклонения уровня зависят от глубины и скорости изменения нагрузки. Чем глубже и быстрее изменяется нагрузка парогенератора, тем больше отклонение уровня от заданного значения.

На объем пароводяной смеси, а следовательно, и на уровень воды в барабане влияют также колебания давления в барабане, которые возникают при изменениях нагрузки парогенератора. При понижении давления часть воды, составляющая пароводяную смесь, испаряется, поэтому уровень повышается. При повышении давления часть пузырьков пара, находящихся в пароводяной смеси, конденсируется, что приводит к снижению уровня. Кроме того, при повышении давления пара уменьшается удельный объем пара, что также вызывает понижение

уровня в барабане. Следует отметить, что влияние давления на поведение уровня воды в барабане сказывается меньше, чем изменение тепловой нагрузки.

б) Влияние на уровень расхода пара и подачи воды

Изменение уровня воды в барабане практически не оказывает влияния ни на поступление воды в парогенератор, ни на расход пара из него. Поэтому парогенератор как объект регулирования уровня не обладает свойством самовыравнивания.

Разность между поступлением воды и расходом пара из парогенератора (небаланс расходов пара и воды) приводит к изменению уровня, определяемому уравнением

$$F(\gamma' - \gamma'') \frac{dH}{dt} = W - D, \quad (46)$$

где H — уровень в барабане парогенератора; F — площадь зеркала испарения; W — поступление воды в парогенератор; D — расход пара из парогенератора; γ' — плотность воды в циркуляционном контуре парогенератора; γ'' — плотность пара.

При исследованиях систем автоматического регулирования уравнения обычно представляют в безразмерных величинах, относя отклонения уровня, изменения подачи воды и расхода пара к наибольшему допустимому отклонению уровня $\Delta H_{\text{наиб}}$, наибольшему поступлению воды $W_{\text{наиб}}$ и наибольшему расходу пара $D_{\text{наиб}}$, т. е. $\varphi_1 = \Delta H / \Delta H_{\text{наиб}}$ — относительное изменение уровня в барабане вследствие небаланса между поступлением воды и расходом пара; $\mu_1 = \Delta W / W_{\text{наиб}}$ — относительное изменение подачи воды; $\lambda = \Delta D / D_{\text{наиб}}$ — относительное изменение расхода пара из парогенератора.

Уравнение (46) в относительных величинах имеет вид:

$$T_1 \frac{d\varphi_1}{dt} = \mu_1 - \lambda, \quad (47)$$

или после интегрирования

$$\varphi_1 = (\mu_1 - \lambda) \frac{t}{T_1}; \quad (48)$$

здесь T_1 — время разгона парогенератора по уровню, т. е. время, в течение которого уровень изменяется от

высшего до низшего допустимых пределов при наибольшем расходе пара и отсутствии подачи воды в парогенератор.

Величина T_1 может быть найдена из уравнения

$$T_1 = \frac{F(\gamma' - \gamma'') \Delta H_{\text{наиб}}}{D_{\text{наиб}}} \quad (49)$$

Резкое увеличение потребления пара при неизменной подаче топлива сопровождается снижением давления в барабане. Из-за этого возрастает объем пароводяной смеси, что приводит к повышению уровня. Это явление называют набуханием уровня.

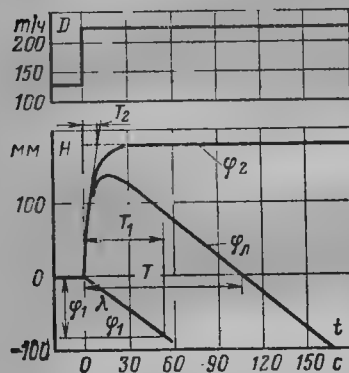


Рис. 48. График процесса разгона по уровню при возмущении расходом пара.

На рис. 48 показана кривая разгона по уровню при возмущении расходом пара D из парогенератора. После изменения расхода пара уровень начнет изменяться в результате появления разности между поступлением воды и расходом пара из парогенератора φ_1 и набухания φ_2 . Результирующая кривая разгона φ_λ определяется суммарным действием обеих составляющих

$$\varphi_\lambda = \varphi_1 + \varphi_2 \quad (50)$$

Отклонение уровня φ_2 вследствие набухания характеризуется постоянной времени T_2 .

В первый момент после увеличения расхода пара уровень в барабане парогенератора резко возрастает, но по прошествии времени T понижается до исходного значения и продолжает изменяться в том же направлении.

Время T , называемое временем набухания, не зависит от величины возмущения и для каждого парогенератора постоянно.

Упрощенная кривая разгона на рис. 48 построена в предположении ряда допущений. Она не учитывает изменений объема пара под зеркалом испарения при колебаниях давления в барабане.

Иной характер имеют кривые разгона при увеличении расхода воды W (рис. 49). Идеализированная кри-

вая 1 построена на основании уравнения (48), не учитывает запаздываний. Кривые 2 и 3 учитывают запаздывания, величина которых зависит от режима работы экономайзера. У парогенераторов с экономайзерами некипящего типа запаздывание сравнительно мало (линия 2). Парогенераторы с экономайзерами кипящего типа имеют значительно большее запаздывание (линия 3). Увеличение запаздывания в этом случае вызвано изменением объема пара в экономайзере.

Таким образом, парогенератор как объект регулирования питания обладает рядом свойств, затрудняющих поддержание уровня в переходных режимах: запаздыванием, явлением набухания и отсутствием самовыравнивания. Вследствие этого при резких изменениях нагрузки парогенератора регулятор может не удержать уровень в барабане в заданных пределах. В таких случаях для уменьшения отклонения уровня следует ограничить скорость изменения нагрузки парогенератора: чем меньше скорость изменения нагрузки, тем меньше колебания уровня в барабане.

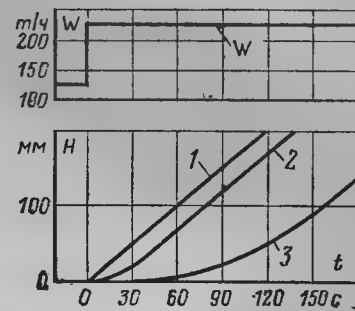


Рис. 49. График процесса разгона по уровню при возмущении расходом воды.

16. ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫЙ РЕГУЛЯТОР ПИТАНИЯ

Простейшим является пропорциональный регулятор питания, схема которого приведена на рис. 50, а.

К регулятору питания РП подводится только один сигнал — по уровню H воды в барабане. В зависимости от величины и знака отклонения уровня регулятор изменяет открытие регулирующего клапана.

Как следует из статической характеристики (рис. 50, б), регулятор поддерживает уровень воды в барабане с положительной неравномерностью. Это означает, что с увеличением нагрузки D уровень H в барабане при установившемся состоянии понижается.

На рис. 51 изображены упрощенные графики переходного процесса, построенные без учета запаздывания в системе и колебательности процесса.

До момента t_1 нагрузка поддерживалась постоянной и равной D_1 . Этой нагрузке соответствовали расход воды

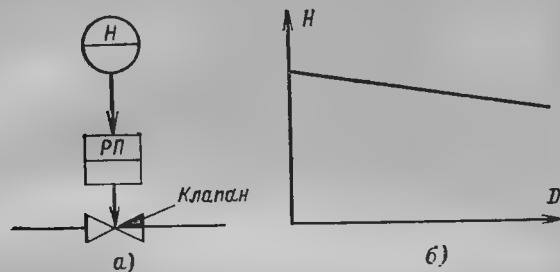


Рис. 50. Пропорциональный регулятор питания.
а — структурная схема; б — статическая характеристика регулирования.

W_1 и уровень в барабане H_1 . В момент t_1 нагрузка резко уменьшена до величины D_2 . Это вызвало падение уровня с H_1 до H_a из-за уменьшения объема пароводяной смеси, заполняющей барабан и трубы топочного экрана парогенератора. Восприняв сигнал по снижению уровня, регулятор увеличит открытие клапана, и подача питательной воды возрастет от W_1 до W_a .

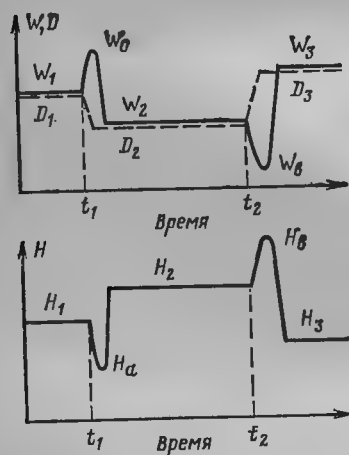


Рис. 51. График регулирования уровня в системе, показанной на рис. 50.

Превышение поступления воды над расходом пара приведет к постепенному повышению уровня. По мере повышения уровня регулятор постепенно уменьшит поступление воды до величины W_2 , соответствующей новой нагрузке D_2 , а в барабане установится новый уровень H_2 , повышенный против первоначального.

В момент t_2 нагрузка была увеличена до значения D_3 , что привело к возрастанию объема пароводяной смеси. Уровень повысится до значения H_b , а регулятор уменьшит поступление воды до W_b . Несоответствие между поступлением воды и расходом пара приведет к снижению уровня и увеличению поступления воды до W_3 . В результате процесса регулирования установится новый уровень H_3 .

Таким образом, регулирование сопровождается значительными колебаниями уровня в барабане. Поэтому регуляторы с воздействием по уровню применяются лишь для парогенераторов, обладающих большим водяным объемом и незначительным тепловым напряжением поверхностей нагрева.

Пропорциональный регулятор питания, действующий при изменении уровня и расхода пара

На рис. 52,а приведена схема пропорционального регулятора питания, воспринимающего два сигнала: по уровню H в барабане и по расходу пара D .

Статическая характеристика (рис. 52,б) получена суммированием характеристики статического регулирования с неравномерностью и характеристики сигнала по расходу пара. Сигнал по расходу пара имеет квадратичную зависимость от нагрузки парогенератора, чем и объясняется форма статической характеристики регулирования.

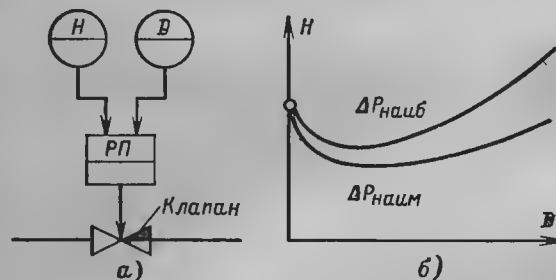


Рис. 52. Пропорциональный регулятор питания, действующий при отклонении уровня и расхода пара.
а — структурная схема; б — статическая характеристика регулирования.

Регулятор воспринимает изменение расхода воды только через отклонение уровня. Положение уровня в основном зависит от нагрузки, но на него влияет и расход воды, определяемый перепадом давлений на регулирующем клапане. Ввиду этого при прочих равных условиях положение уровня зависит от перепада давлений на регулирующем клапане. На графике рис. 52,б это показано двумя

линиями статической характеристики при постоянных перепадах $\Delta P_{\text{вдв}} и \Delta P_{\text{нагм}}$. Область возможных положений уровня находится между этими двумя статическими характеристиками.

Таким образом, при изменениях расхода пара из парогенератора рассматриваемый регулятор вступает в действие еще до отклонения уровня в барабане, что улучшает качество процесса регулирования.

Недостаток регулятора в том, что он может учитывать изменения подачи воды в парогенератор только через отклонение уровня в барабане. При увеличении по какой-либо причине давления перед клапаном поступление воды в парогенератор также увеличится. Разновесие между расходом пара и поступлением воды нарушится, и уровень начнет повышаться. Только с повышением уровня в барабане регулятор вступит в действие и начнет прикрывать клапан. Действие регулятора будет продолжаться до наступления состояния равновесия, при котором установится новый уровень в барабане.

Регуляторы такого типа используются для парогенераторов, у которых на поведение уровня в барабане оказывает заметное влияние набухание, а колебания давления в питательном трубопроводе незначительны.

17. КОМБИНИРОВАННЫЙ РЕГУЛЯТОР ПИТАНИЯ

К комбинированному регулятору питания (рис. 53, а) подводятся три сигнала: по уровню H в барабане, расходу пара D и поступлению воды W в парогенератор.

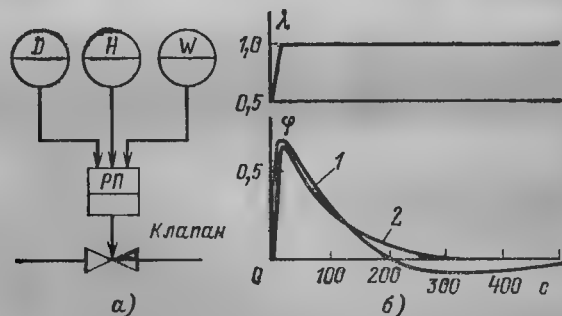


Рис. 53. Комбинированный регулятор питания.

а — структурная схема; б — график регулирования уровня при возмущении изменением нагрузки.

Не воспринимая непосредственно колебания расхода воды, регулятор реагирует только на отклонения уровня, вызываемые этими колебаниями, что ухудшает качество его поддержания.

Дополнение регулятора (рис. 52, а) сигналом по расходу воды устраняет этот недостаток. При изменениях подачи питательной воды сигнал по ее расходу приводит

действие регулятора еще до того, как уровень отклонится от установившегося значения.

Регулятор настраивается таким образом, чтобы изменения расходов воды и пара на одинаковую величину вызывали одинаковые, но направленные противоположно перемещения клапана. При такой настройке изменения расхода пара приведут к соответствующему изменению расхода воды, и уровень по окончании процесса регулирования не изменится. В установившемся состоянии регулятор поддерживает постоянный уровень независимо от нагрузки парогенератора, что также является достоинством данного регулятора.

Корректирующее воздействие по уровню необходимо для устранения неточности настройки сигналов по расходам воды и пара.

На рис. 53, б в качестве примера приведены графики изменения относительного уровня φ при возмущении нагрузкой λ . Переходный процесс регулирования уровня комбинированным регулятором показан на графике 2. Для сравнения на графике приведена кривая 1, которая показывает переходный процесс регулирования уровня пропорциональным регулятором (рис. 52).

Из сопоставления обеих кривых следует, что качество регулирования при комбинированном регуляторе лучше, чем при пропорциональном.

Комбинированные регуляторы питания широко применяются при автоматизации современных барабанных парогенераторов.

Электронный регулятор питания

На рис. 54 изображена принципиальная схема регулирования питания барабанного парогенератора с использованием электронного регулятора. Схема стала типовой для современных парогенераторов.

К электронному регулирующему прибору 1 подводятся сигналы: по уровню H в барабане, расходу пара D из парогенератора и поступлению воды W в парогенератор. Сигналы воспринимаются дифманометрами. Дифманометр 2, измеряющий отклонение уровня в барабане, соединен с уравнительным сосудом 3, сообщающимся с паровым и водяным пространством барабана. Наружная трубка сосуда сообщается с паровым пространством барабана, и уровень конденсата в ней сохраняется постоянным: конденсат, образующийся

в этой трубке, через отверстие перетекает во внутреннюю трубу. Внутренняя труба сообщается с водяным пространством барабана, и уровень в ней всегда соответствует уровню в барабане. Разность столбов воды в уравнильном сосуде воспринимается дифманометром 2, где преобразуется в электрический сигнал, подводимый к измерительному блоку регулирующего прибора 1.

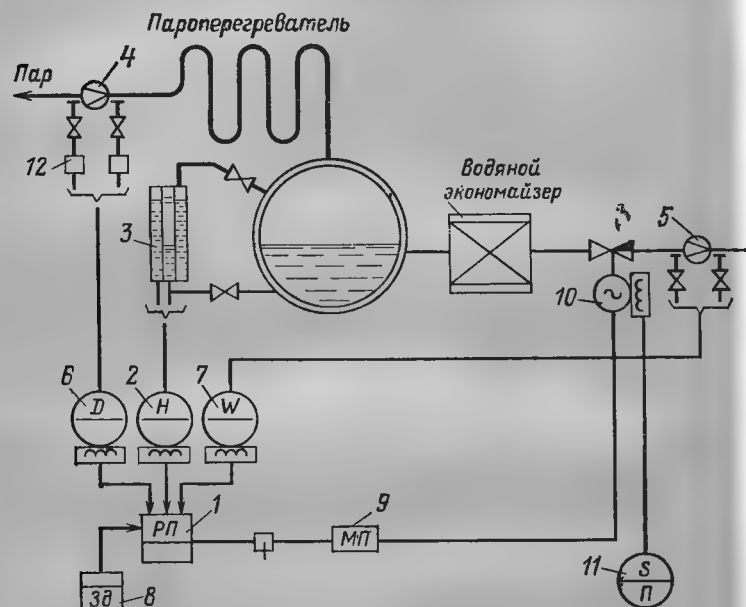


Рис. 54. Принципиальная схема электронного регулятора питания.

Сигналы по расходу пара и воды воспринимаются с помощью первичных измерительных преобразователей, установленных на паропроводе и питательном трубопроводе. На паропроводе монтируется сопло 4, на питательном трубопроводе — измерительная диафрагма 5. Разность давлений на первичных измерительных преобразователях воспринимается дифманометрами 6 и 7, с помощью которых преобразовывается в электрические сигналы, подводимые к регулируемому прибору.

В измерительном блоке регулирующего прибора воздействия этих сигналов настраиваются так, чтобы в установившемся режиме работы парогенератора они

взаимно уравнивались. При заданном уровне в барабане парогенератора сигнал от дифманометра 2 уравнивается сигналом от датчика 8, с помощью которого можно изменять уровень, поддерживаемый регулятором в установившемся состоянии.

В случае отклонения уровня воды от заданного значения или нарушения баланса между поступлением воды и расходом пара на выходе измерительного блока появляется сигнал постоянного тока, пропорциональный входному сигналу и имеющий полярность, зависящую от отклонения. Сигнал от измерительного блока поступает в электронный блок регулирующего прибора, на выходе которого формируется сигнал, управляющий с помощью реверсивного магнитного пускателя 9 силовыми цепями электропривода 10 регулирующего клапана. Электропривод представляет собой электродвигатель с редуктором, смонтированный на корпусе регулирующего клапана.

Открытие клапана контролируется по показаниям индикатора положения 11.

Для предотвращения попадания пара в дифманометр 6 на паровых соединительных линиях установлены конденсатные бачки 12. При работе парогенератора конденсатные бачки и линии, соединяющие бачки с дифманометром, заполнены конденсатом.

18. РЕГУЛИРОВАНИЕ НЕПРЕРЫВНОЙ ПРОДУВКИ

В питательной воде растворены соли, допустимое количество которых определяется нормами. В процессе парообразования эти соли остаются в котловой воде и постепенно накапливаются.

Некоторые соли образуют шламы — твердое вещество, кристаллизующееся в котловой воде. Более тяжелая часть шлама скапливается в нижних участках барабана и коллекторов. Этот шлам удаляется с периодической продувкой, осуществляемой вручную.

Повышение концентрации солей в котловой воде выше допустимых величин может привести к уносу их в пароперегреватель и турбину. Поэтому соли, скопившиеся в котловой воде, удаляются с непрерывной продувкой, которая чаще всего регулируется автоматически.

Накапливаются соли в котловой воде с небольшой скоростью. Кривая разгона по солесодержанию котловой воды характеризуется постоянной времени $T = 10-40$ мин и временем запаздывания

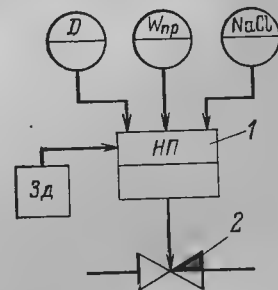


Рис. 55. Структурная схема регулятора непрерывной продувки.

$\tau=1-3$ мин. Указанные динамические свойства участка регулирования обуславливают использование пропорциональных регуляторов.

Регулирование непрерывной продувки парогенераторов, установленных на ТЭЦ, чаще всего осуществляется по схеме, изображенной на рис. 55.

К измерительному блоку регулирующего прибора 1 подводятся сигналы от трех измерительных преобразователей: дифманометра D , измеряющего расход пара из парогенератора; дифманометра $W_{пр.}$ характеризующего расход продувочной воды; преобразователя соле-содержания $NaCl$, определяющего содержание солей в продувочной воде. Допустимая величина солесодержания котловой воды устанавливается задатчиком Zd , сигнал от которого вводится в измерительный блок регулирующего прибора.

Воздействуя на клапан 2, регулятор изменяет расход продувочной воды пропорционально производительности парогенератора. Одновременно эта зависимость корректируется сигналом по солесодержанию котловой воды.

Для парогенераторов, установленных на ГРЭС, величина непрерывной продувки незначительна и составляет около 0,5% номинальной производительности парогенератора, поэтому регулировать ее автоматически нецелесообразно. В этом случае предусматривается дистанционное управление клапаном, установленным на трубопроводе непрерывной продувки.

Контрольные вопросы

1. Какими свойствами обладает парогенератор как объект регулирования питания?
2. Перечислите причины, вызывающие колебания уровня в барабане парогенератора.
3. Как изменяется уровень в барабане при колебаниях тепловыделения в топке?
4. В каких случаях и каким образом проявляется явление набухания уровня?
5. Изобразите и поясните кривую разгона по уровню при возмущении расходом пара.
6. Охарактеризуйте переходный процесс регулирования уровня в барабане простейшим пропорциональным регулятором.
7. Как настраиваются сигналы, поступающие в измерительный блок электронного регулятора питания?
8. Поясните устройство уравнительного сосуда.
9. В каких случаях вступает в действие электронный регулятор питания?
10. Чем объясняется использование пропорционального регулятора для регулирования непрерывной продувки?
11. Поясните схему регулятора непрерывной продувки.

Глава четвертая

АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ В БАРАБАННЫХ ПАРОГЕНЕРАТОРАХ

19. ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ

Режим работы парогенераторов электростанции определяется нагрузкой турбин. В каждый момент времени парогенераторы должны вырабатывать столько пара, сколько его потребляют турбины. С увеличением нагрузки турбин, например, производительность парогенераторов должна быть увеличена. Показателем соответствия между выработкой пара парогенераторами и потреблением турбинами служит давление пара в барабане парогенератора или в паропроводе между парогенераторами и турбинами. Увеличение давления пара указывает на то, что производительность парогенераторов превышает потребность турбин в паре. В этом случае производительность парогенераторов необходимо снизить. При уменьшении давления пара производительность парогенераторов должна быть повышена.

Выработка пара парогенератором зависит от количества тепла, выделившегося в топке при сгорании топлива. Если в топке выделяется тепла больше, чем необходимо для выработки нужного количества пара, то излишнее тепло приводит к росту давления пара. Недостаточная подача топлива в топку приводит к снижению давления пара. Таким образом, регулирование подачи топлива должно обеспечивать поддержание постоянного давления пара, вырабатываемого парогенератором.

Давление пара должно быть постоянным и для обеспечения экономичной работы турбины. В соответствии с принятыми нормами давление пара в установившихся режимах должно поддерживаться с отклонениями, не превышающими $\pm 2\%$ номинального.

Экономичный режим горения топлива обеспечивается при подаче в топку воздуха в количестве, определяемом равенством

$$V_B = \alpha V_T, \quad (51)$$

где α — коэффициент избытка воздуха; V_T — теоретически необходимое количество воздуха.

Оптимальные значения коэффициента избытка воздуха для различных нагрузок определяются при испытаниях парогенераторной установки.

Увеличение избытка воздуха против оптимального приводит к дополнительным потерям тепла с уходящими газами, а снижение — к появлению потерь с химическим и механическим недожогом. Подача воздуха в топку должна обеспечить поддержание оптимальных избытков воздуха, при которых обеспечивается экономичное сжигание топлива. Избыток воздуха определяется путем измерения процентного содержания кислорода O_2 или углекислоты CO_2 в продуктах сгорания. Зная, например, содержание свободного кислорода O_2 , выраженное в процентах от объема газов, величину α при полном сгорании топлива можно найти из следующего упрощенного уравнения:

$$\alpha = \frac{21}{21 - O_2}, \quad (52)$$

где число 21 характеризует процентное содержание кислорода в воздухе, подаваемом в топку.

Автоматическая подача воздуха регулируется по косвенным показателям: количеству топлива, расходу пара, количеству тепла и др. Расход воздуха регулируется изменением производительности дутьевых вентиляторов.

Для поддержания устойчивого процесса горения необходимо удалять продукты сгорания, образующиеся при сгорании топлива. На всех парогенераторах, кроме работающих под наддувом, продукты сгорания удаляются дымососами. Косвенным показателем соответствия между подачей в топку топлива и воздуха и удалением продуктов сгорания служит разрежение в топочной камере. Увеличение разрежения в топочной камере приводит к возрастанию присосов воздуха в топку и газоходы. При этом увеличивается расход электроэнергии на привод дымососа, и экономичность работы парогенератора снижается. Нельзя допускать в топке и избыточное давление (кроме котлов, работающих под наддувом), так как при этом дымовые газы будут попадать в помещение котельной. Топочная камера при работе парогенератора постоянно должна находиться под разрежением.

Разрежение по высоте топочной камеры неодинаково: из-за самотяги разрежение в нижней части топочной камеры больше, чем в верхней. Поэтому, поддерживая

наименьшее разрежение в верхней части топки, ставят всю топочную камеру под разрежение. Обычно разрежение в верхней части топки поддерживается в пределах 20—30 Па. Разрежение регулируется изменением производительности дымососов.

Таким образом, регулирование процесса горения барабанного парогенератора, работающего с уравновешенной тягой, сводится к управлению его нагрузкой путем изменения подачи топлива и воздуха (изменением производительности дутьевых вентиляторов и топливopоддающих устройств) и регулированию разрежения (изменением производительности дымососов). Для выполнения этого система автоматического регулирования процесса горения парогенераторной установки должна включать в себя три основных регулятора:

- 1) регулятор топлива, являющийся регулятором нагрузки парогенератора;
- 2) регулятор воздуха, выполняющий роль регулятора экономичности сжигания топлива;
- 3) регулятор разрежения, обеспечивающий постоянное разрежение в топочной камере.

Перечисленное распределение функций между регуляторами процесса горения наиболее распространено. Иногда встречаются системы авторегулирования с иным распределением функций между регуляторами. Например, регулятор нагрузки парогенератора может воздействовать на расход воздуха, а величина последнего служит основным сигналом, подаваемым к регулятору топлива.

Способ регулирования нагрузки парогенераторов зависит от тепловой схемы электростанции. При работе парогенератора в блоке с турбиной весь пар, вырабатываемый парогенератором, потребляется одной определенной турбиной. Различают моноблоки, если турбину обеспечивает паром один парогенератор или два корпуса парогенератора, не имеющие отключающей арматуры. В дубли-блоках турбина потребляет пар от двух парогенераторов или от двух симметричных корпусов парогенератора с наличием отключающей арматуры в тепловой схеме энергоблока.

Кроме блочных схем, существуют схемы с поперечными связями, когда пар от парогенераторов, установленных на электростанции, поступает в общую паровую магистраль, из которой он отбирается турбинами.

При работе моноблока регулятор нагрузки парогенератора должен обеспечить соответствие между производительностью парогенератора и потреблением пара турбиной. Это достигается поддержанием постоянного давления пара перед турбиной.

При параллельной работе парогенераторов на общую паровую магистраль давление пара должно поддерживаться в этой магистрали. Регулятор, поддерживающий заданное давление в паровой магистрали, называют главным или корректирующим, регулятором. Главный регулятор управляет нагрузкой всех парогенераторов, участвующих в регулировании нагрузки электростанции. Его применяют также при автоматическом регулировании процесса горения парогенераторов дубль-блока.

В последние годы все большее распространение получают барабанные парогенераторы с газоплотными ограждающими стенками, работающие под наддувом. Применение наддува предъявляет ряд требований к конструкции парогенератора и, в частности, к обеспечению надежной газоплотности. Это требование наиболее сложно выполнить для топочной камеры, в которой давление дымовых газов значительно.

В парогенераторах с наддувом трубы пароперегревателя проходят через сварные панели потолка, имеющего второе перекрытие. Пространство между перекрытиями при работе парогенератора заполнено воздухом, подаваемым под напором дутьевого вентилятора. Давление воздуха между перекрытиями автоматически поддерживается на уровне, несколько превышающем давление в топочной камере. При выполнении этого условия через неплотности в потолочном перекрытии не проникают газы из топки, а перетоки воздуха в топку незначительны.

Неплотности газовоздушного тракта иногда возникают в процессе эксплуатации. В таких случаях парогенератор, работающий под наддувом, временно, до устранения неплотностей, переводят на работу с уравновешенной тягой. При этом в работу вводится резервный дымосос и регулятор, автоматически поддерживающий разрежение в топочной камере.

На работающем парогенераторе система автоматического регулирования процесса горения воспринимает внешние и внутренние возмущения. Изменение нагрузки турбины является внешним возмущением для парогене-

ратора. Внутренние возмущения весьма разнообразны. К ним относятся изменения калорийности топлива, его влажности или зольности, а также изменение числа работающих горелок, различные нарушения в топливopодаче и т. д. Внутренние возмущения носят случайный или периодический характер. Система автоматического регулирования процесса горения парогенератора должна быстро приходить в установившееся состояние, обеспечивая высокое качество регулирования как при внешних, так и при внутренних возмущениях.

20. СВОЙСТВА ПАРОГЕНЕРАТОРА КАК ОБЪЕКТА РЕГУЛИРОВАНИЯ ДАВЛЕНИЯ ПАРА И ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКИ

Основными регулируемыми параметрами парогенератора являются расход, давление и температура пара. Поведение перечисленных параметров в значительной мере определяется интенсивностью процесса горения в топке.

При работе парогенератора в блоке с турбиной основным возмущением является изменение потребления пара турбиной. При сбросе нагрузки турбиной, например, давление в барабане растет.

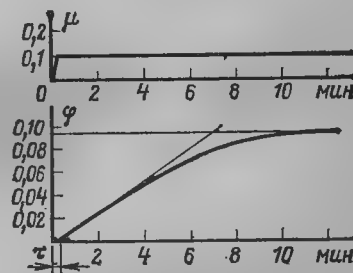


Рис. 56. Экспериментальная характеристика разгона котла по давлению пара в барабане при возмущении изменением подачи топлива.

Для парогенераторов, сжигающих твердое топливо, чаще других проявляются возмущения, вызываемые изменением количества, сорта, влажности или зольности подаваемого в топку топлива.

Возмущением для парогенератора является также и изменение подачи питательной воды. Влияние этого возмущения на изменение давления в барабане незначительно.

В качестве примера на рис. 56 приведена экспериментальная кривая разгона котла по давлению в бара-

бане ф при возмущении подачи топлива μ . Величина запаздывания τ определяется аккумуляцией тепла в металле топки, а также загрязнениями поверхностей нагрева.

Парогенератор как объект регулирования представляет собой сложное динамическое звено. Без учета пароперегревателя его можно представить в виде трех участков, соединенных последовательно (рис. 57), а именно: топочной камеры 1, топочных экранов 2 и барабана 3.

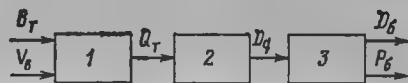


Рис. 57. Функциональная схема парогенерирующей части как объекта регулирования нагрузки.

Для первого участка входными величинами являются расходы топлива B_T и воздуха V_B , поступающих в топку. Выходной величиной этого участка можно считать величину тепловыделения в топочной камере Q_T . При возмущении топливом кривая разгона первого участка приближенно может быть описана уравнением экспоненты:

$$\Delta Q_T = \Delta B_T K_T \left(1 - e^{-\frac{t}{T_T}} \right), \quad (53)$$

где K_T — размерный коэффициент, кДж/кг.

Таким образом, топочную камеру можно представить в виде инерционного звена первого порядка с передаточной функцией:

$$W(p) = \frac{K_T}{1 + T_T p}. \quad (54)$$

Постоянная времени T_T зависит от многих факторов и может изменяться в широких пределах.

Лучистое тепло воспринимается топочными экранами, в которых происходит парообразование. В барабане, куда поступает пароводяная смесь, пар сепарируется (отделяется) от воды.

Тепловыделение в топке является входным сигналом для парогенерирующих поверхностей нагрева (топочные экраны). Колебания тепловыделения приводят к одновременному изменению двух параметров: расхода пара

D_6 и давления в барабане P_6 . В начальный момент после нанесения возмущения скорость изменения давления в барабане dP_6/dt прямо пропорциональна теплу, затраченному на нагрев пароводяной смеси, т. е. разности между воспринятым смесью и ушедшим с паром количествами тепла:

$$\frac{A_n dP_6}{dt} = Q_T - D_6 (i'' - i_{п.в}), \quad (55)$$

где A_n — коэффициент пропорциональности, характеризующий тепловую аккумулирующую способность пароводяной смеси и металла топочных экранов; i'' — удельная энтальпия насыщенного пара на выходе из барабана; $i_{п.в}$ — удельная энтальпия питательной воды.

Разделив левую и правую части уравнения (55) на $i'' - i_{п.в}$, получим:

$$\frac{A_n}{i'' - i_{п.в}} \frac{dP_6}{dt} = \frac{Q_T}{i'' - i_{п.в}} - D_6. \quad (56)$$

Обозначим:

$$\frac{A_n}{i'' - i_{п.в}} = C_n \text{ и } \frac{Q_T}{i'' - i_{п.в}} = D_q.$$

Учитывая, что $D_6 \approx D$, где D — расход пара из парогенератора, после подстановки в (56) получаем:

$$C_n \frac{dP_6}{dt} = D_q - D,$$

откуда

$$D_q = D + C_n \frac{dP_6}{dt}, \quad (57)$$

где C_n — коэффициент пропорциональности, характеризующий аккумулирующую способность пароводяной смеси и металла топочных экранов, кг/МПа; D_q — тепловая нагрузка парогенератора, характеризующая тепловосприятие металла топочных экранов в единицу времени, выраженное в единицах расхода пара, кг/с.

Суммарный сигнал получил название сигнала по тепловой нагрузке, или сокращенно по «теплу».

Таким образом, тепловая нагрузка численно выражается расходом пара, который был бы выработан парогенератором, если бы все тепло, воспринятое им, было бы использовано на парообразование.

В системах пылеприготовления с прямым вдуванием пыли в топочную камеру используются среднеходные, быстроходные молотковые мельницы и мельницы-вентиляторы. Перечисленные мельницы оказывают существенное влияние на динамические свойства парогенераторной установки.

Топливо, поступающее в мельницу, размалывается, подсушивается и выносится в топку первичным воздухом. Количество угольной пыли, подаваемой в топку, зависит от загрузки мельницы топливом и скорости первичного воздуха в мельнице. С увеличением загрузки топливом производительность мельницы повышается. При этом повышается также мощность, потребляемая электроприводом мельницы. Скорость первичного воздуха определяет тонину помола пыли, выносимой из мельницы в топку: чем выше скорость первичного воздуха, тем более крупные частицы угля уносятся им в топку. Поэтому вынос пыли из мельницы в топку зависит от загрузки ее топливом и от скорости, а следовательно, и от расхода первичного воздуха.

Свойства мельниц, используемых в системах пылеприготовления с прямым вдуванием пыли в топочную камеру, должны учитываться при проектировании систем авторегулирования процесса горения.

21. ОСОБЕННОСТИ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ ПРИ СЖИГАНИИ РАЗЛИЧНЫХ ТОПЛИВ

В топках большинства парогенераторов сжигаются различные каменные угли, природный газ и мазут. Реже сжигаются торф, сланец, доменный и коксовый газы. Каменные угли в парогенераторах большой мощности сжигаются в пылевидном состоянии. В парогенераторах малой мощности уголь часто сжигается в слое.

Угольная пыль чаще всего готовится в тихоходных шаровых барабанных мельницах. Готовая пыль уносится из мельниц воздухом в циклон — устройство, в котором пыль отделяется от воздуха. Выделившаяся в циклоне пыль поступает в промежуточный бункер, в котором накапливается ее запас. Пыль из промежуточного бункера пылепитателями сбрасывается в пылепроводы, где смешивается с первичным воздухом. Образовавшаяся аэрозоль через горелки подается в топочную камеру. Емкость пылевого бункера рассчитывается

на несколько часов работы парогенератора, поэтому режимы работы системы пылеприготовления и парогенератора не зависят друг от друга.

Системы пылеприготовления с прямым вдуванием пыли в топочную камеру применяются реже. При использовании такой системы производительность мельницы все время должна соответствовать нагрузке парогенератора. Поэтому производительность мельниц должна регулироваться в зависимости от нагрузки парогенератора. Например, с увеличением нагрузки парогенератора должна увеличиваться и производительность мельниц.

Особенность слоевого сжигания состоит в том, что интенсивность процесса горения определяется подачей воздуха в зону горения, а не количеством топлива, находящегося на цепной решетке. Экономичность процесса горения обеспечивается регулированием средней толщины слоя топлива на решетке путем регулирования скорости ее движения.

Трудность автоматизации регулирования процесса горения при сжигании твердых топлив состоит в том, что получить сигнал, непосредственно характеризующий количество тепла, выделившегося в топке при сгорании топлива, не представляется возможным.

Количество тепла пропорционально расходу топлива при постоянной его калорийности. Однако в настоящее время нет приборов для непрерывного и надежного измерения количества угольной пыли, подаваемой в топку парогенератора.

Иногда оценивают количество топлива, поступающего в топку, по частоте вращения питателей пыли. Такой способ недостаточно точен, так как при одной и той же частоте вращения пылепитатели могут иметь разную производительность в зависимости от влажности пыли, запаса ее в бункере и других не учитываемых факторов.

В установленном режиме работы парогенератора расход пара примерно пропорционален количеству тепла, выделившегося в топке. Однако при нарушении установленного режима расход пара не характеризует количество тепла. В переходных режимах, например при увеличении нагрузки, часть тепла тратится на нагрев пароводяной смеси и металла поверхностей нагрева парогенератора. При снижении нагрузки часть тепла, аккумулированного в пароводяной смеси и металле, затрачивается на парообразование.

Тепловыделение в топке достаточно полно характеризуется уравнением (57). Суммарный сигнал по расходу пара из парогенератора и скорости изменения давления в барабане получил название сигнала по тепловой нагрузке, или сокращенно по «теплу». Сигнал по тепловой нагрузке часто применяют в схемах автоматического регулирования процесса горения парогенераторов, сжигающих пылевидное топливо.

Известны и другие способы косвенной оценки тепловыделения в топке, например по перепаду давлений на циркуляционном контуре барабанного парогенератора, «тепловосприятию» топочных экранов, по излучению факела.

Автоматическое регулирование процесса горения при сжигании природного газа или мазута облегчается тем, что расход топлива, поступающего в топку, можно измерить.

Калорийность природного газа, поступающего из определенного месторождения, практически постоянна, и расход его можно измерить обычными способами. Следовательно, нагрузку парогенератора можно регулировать, изменяя подачу газа в топку. Расход газа регулируется клапаном, установленным на общем участке газопровода перед горелками. Поэтому схема автоматического регулирования подачи топлива и воздуха в топку парогенератора, сжигающего природный газ, значительно проще, чем для парогенератора, сжигающего пылевидное топливо.

Измерение расхода мазута труднее осуществить. Однако сигнал по расходу мазута широко применяется в схемах автоматического регулирования процесса горения в парогенераторах, сжигающих мазут. При сжигании мазута, особенно с высоким содержанием серы, должна быть предотвращена коррозия низкотемпературных поверхностей нагрева, главным образом воздухоподогревателя.

Низкотемпературная коррозия обуславливается образованием SO_3 путем окисления SO_2 свободным кислородом. Температура продуктов сгорания сернистого мазута по мере отдачи тепла поверхностям нагрева снижается. При температуре, соответствующей точке росы, водяные пары, содержащиеся в продуктах сгорания, конденсируются. Влага, отлагающаяся на поверхностях нагрева, насыщается SO_3 . Образующаяся серная кислота

разъедает поверхности нагрева. Отсюда вытекает необходимость сжигания сернистого мазута с малыми избытками воздуха.

При работе парогенератора с избытками воздуха, составляющими $\alpha_t = 1,02 \div 1,04$, предотвращается образование SO_3 . При этом снижается температура точки росы, повышается коэффициент полезного действия парогенератора за счет снижения расхода электроэнергии на привод дутьевых вентиляторов.

Полностью избежать коррозии хвостовых поверхностей нагрева можно лишь при работе парогенератора с предельно малыми избытками воздуха, составляющими $\alpha_t = 1,005 \div 1,02$. Такой режим работы может быть достигнут в парогенераторе с газоплотными ограждающими стенками, исключающими присосы воздуха в топку.

Таким образом, особенность регулирования парогенераторов, сжигающих мазут с малыми и предельно малыми избытками воздуха в топке, состоит в необходимости точного поддержания оптимальных избытков воздуха. По мере снижения их все более увеличивается опасность неполного сгорания и связанное с ним отложение сажи на поверхностях нагрева. Одним из основных условий обеспечения оптимального режима горения является равномерное распределение топлива и воздуха по горелкам. Для этого могут быть использованы как конструктивные мероприятия (моделирование и точное изготовление воздухопроводов и форсунок), так и регулирование расходов воздуха по горелкам.

Регулирование расхода воздуха применяется общее на парогенератор, погорелочное (на каждую горелку) или групповое (на группу горелок). Выбор схемы регулирования воздуха определяется конструктивными особенностями парогенератора и режимом его работы. Подача воздуха в топку чаще всего регулируется по соотношению «расход топлива — расход воздуха».

При работе парогенератора качество топочного процесса может быть нарушено вследствие колебаний калорийности и влажности мазута, температуры и давления воздуха, работы форсунок и других причин. В таких случаях целесообразно корректировать соотношение «топливо — воздух» по показателям избытка воздуха, полноте сгорания топлива, а также коррозионной активности продуктов сгорания. Наиболее часто для коррекции используются сигналы по содержанию кислорода

в дымовых газах и по оптической плотности продуктов сгорания.

Газоанализаторы на кислород характеризуют избыток воздуха только при нормальной работе парогенератора в установившемся режиме. При изменениях нагрузки и режима работы (включение и отключение горелок, обдувка поверхностей нагрева и т. п.) парогенератора представительность сигналов газоанализаторов недостаточна. Кроме того, газоанализаторы на кислород характеризуются инерционностью и необходимостью тщательного обслуживания.

Преобразователи, измеряющие оптическую плотность продуктов сгорания, малоинерционны и высокочувствительны. Они просты, надежны и не требуют тщательного обслуживания. Недостаток их — трудность обеспечения стабильности показаний.

22. СТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ

а) Регулирование процесса горения парогенератора, работающего на пыли, с пробункером

На рис. 58 изображен один из наиболее распространенных вариантов схемы автоматического регулирования процесса горения для парогенератора, пар от которого поступает в общую магистраль котельной. Нагрузка параллельно работающих парогенераторов задается главным регулятором $ГР$, получающим сигнал по давлению пара P_m в магистрали котельной. На выходе главного регулятора вырабатывается сигнал, пропорциональный величине отклонения давления пара. Этот сигнал служит заданием для регуляторов топлива $РТ$ и воздуха $РВ$ рассматриваемого парогенератора. Аналогичные сигналы подаются к регуляторам других парогенераторов, работающих на общую паровую магистраль.

Регулятор топлива, кроме задания от главного регулятора, получает сигнал по тепловой нагрузке, характеризующий тепловыделение в топке, в виде суммы двух сигналов: по расходу пара из парогенератора D и скорости изменения давления в барабане dP_6/dt . Сигнал по скорости изменения давления в барабане в установившихся состояниях равен нулю, поэтому его иногда назы-

вают исчезающим, или скоростным, сигналом. Изменения тепловой нагрузки парогенератора, работающего на пыли, чаще всего вызываются нарушением подачи топлива в топку. Регулятор топлива при любых возмущениях в системе воздействует на подачу топлива в топку до восстановления равновесия системы.

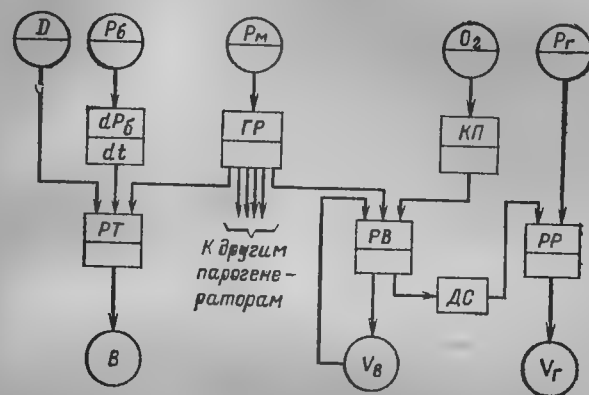


Рис. 58. Структурная схема автоматического регулирования процесса горения парогенератора с пылеугольной топкой.

Подача топлива в топку регулируется одновременным изменением частоты вращения электродвигателей всех пылепитателей парогенератора. Для обеспечения плавного регулирования частоты вращения пылепитатели обычно оснащаются электродвигателями постоянного тока с параллельным возбуждением. Частота вращения таких электродвигателей может регулироваться изменением тока в обмотке возбуждения или изменением напряжения в якоре.

При регулировании электродвигателей пылепитателей применяются оба способа. Для регулирования электродвигателей изменением тока возбуждения применяют станцию регулирования питателей пыли типа СПП. Частота вращения электродвигателей в этом случае изменяется ступенями. Регулирование изменением напряжения в якоре осуществляется системой бесступенчатого регулирования пылепитателей типа АР-ПП. Частота

вращения электродвигателей в этом случае регулируется плавно и обеспечивается более широкий диапазон регулирования. Поэтому для мощных парогенераторов регулирование изменением напряжения в якоре имеет преимущественное применение.

Регулятор воздуха $PВ$, помимо задания от главного регулятора, получает сигнал по расходу общего воздуха V_B и корректирующий сигнал по содержанию кислорода O_2 в дымовых газах. Сигнал по содержанию кислорода вырабатывается корректирующим прибором $КП$. Содержание кислорода в дымовых газах однозначно характеризует избыток воздуха в топке и почти не зависит от состава топлива. Поэтому сигнал по O_2 вводится в схему для корректирования подачи воздуха в топку.

Воздушный режим при работе парогенератора нарушается из-за присосов воздуха в топку, изменения режима работы горелок и других причин. При этом в действие вступает корректирующий прибор по содержанию кислорода в дымовых газах. Корректирующий прибор воздействует на регулятор воздуха до восстановления заданного содержания кислорода за счет изменения подачи воздуха в топку. Расход воздуха регулируется воздействием регулятора на направляющие аппараты дутьевых вентиляторов.

К регулятору разрежения $РР$ подводится сигнал по разрежению в верхней части топки P_T . На мощных парогенераторах предусматривается динамическая связь $ДС$, с помощью которой выходной сигнал регулятора воздуха подается на вход регулятора разрежения. Регулятор $РР$ поддерживает постоянное разрежение, воздействуя на направляющие аппараты дымососов, отсасывающих продукты сгорания из топочной камеры.

Благодаря наличию динамической связи регулятор разрежения вступает в действие не только в случаях изменения разрежения в топочной камере, но и в момент включения в работу регулятора воздуха.

Применение схем с использованием сигналов по тепловой нагрузке для парогенераторов, работающих на общую паровую магистраль, позволяет предотвратить самопроизвольное перераспределение нагрузки между парогенераторами. При нарушениях подачи топлива в топку любого парогенератора система регулирования восстанавливает нарушение еще до того, как отклонится давление пара в общей магистрали.

б) Регулирование процесса горения парогенератора со среднеходными мельницами

Один из возможных вариантов схемы регулирования процесса горения для парогенератора со среднеходными мельницами изображен на рис. 59 (применительно к парогенератору, работающему на общую паровую магистраль котельной). Давление пара P_M в магистрали служит входным сигналом для главного регулятора $ГР$, задание от которого одновременно подается регуляторам

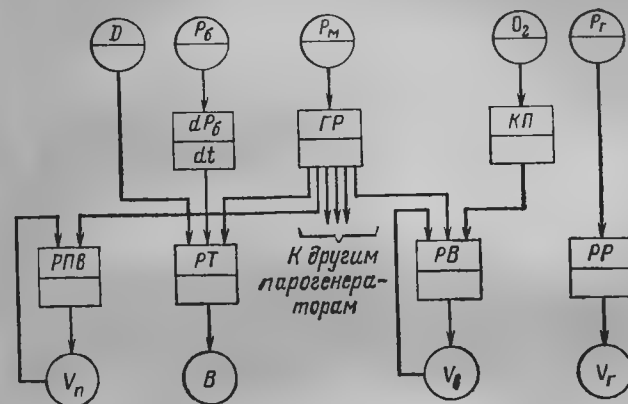


Рис. 59. Структурная схема автоматического регулирования процесса горения парогенератора со среднеходными мельницами.

топлива $РТ$, воздуха $РВ$ и первичного воздуха $РПВ$. Регулятор топлива дополнительно получает сигнал по тепловой нагрузке и управляет подачей сырого топлива B в мельницы, количество которых зависит от производительности парогенератора. Питатели сырого топлива оснащаются электродвигателями постоянного тока, частоту вращения которых можно регулировать в широком диапазоне. При автоматизации современных парогенераторных установок часто применяется способ регулирования электродвигателей изменением напряжения в якоре, для чего создана система бесступенчатого регулирования типа АР-СП. С помощью этой системы регулируется подача топлива одновременно ко всем мельницам парогенератора.

Вынос пыли из мельницы в топку зависит не только от загрузки мельницы углем, но и от скорости первичного воздуха в мельнице. Поэтому в схеме регулирования процесса горения предусматривается регулятор первичного воздуха РПВ. Она получает задающий сигнал от главного регулятора и сигнал по расходу первичного воздуха $V_{\text{п}}$, поступающего в мельницу. Регулятор управляет клапаном, установленным на воздухопроводе первичного воздуха перед мельницей. Для каждой мельницы предусматривается отдельный регулятор первичного воздуха (на схеме рис. 59 условно изображен регулятор одной мельницы).

В качестве воздействия, характеризующего загрузку мельницы топливом, в регуляторе первичного воздуха иногда используется сигнал, пропорциональный мощности, потребляемой из электросети приводным электродвигателем мельницы, либо сигнал от системы АР—СП, пропорциональный напряжению в якорях электродвигателей питателей топлива.

Регулятор воздуха РВ получает задание от главного регулятора, сигнал по расходу воздуха $V_{\text{в}}$ и сигнал от прибора КП, корректирующего подачу воздуха по содержанию кислорода O_2 в дымовых газах.

При увеличении нагрузки парогенератора регулятор топлива увеличивает подачу топлива в мельницы. Одновременно увеличивается подача первичного воздуха регулятором РПВ. При этом вынос пыли из мельниц в топку увеличится за счет некоторого запаса пыли в мельницах. С повышением нагрузки парогенератора в действие вступает и регулятор воздуха, увеличивающий производительность дутьевых вентиляторов. Увеличение подачи топлива и воздуха приводит к изменению разрежения в топке. Поэтому в действие вступает регулятор разрежения РР, увеличивающий производительность дымососов. Система придет в новое установившееся состояние, когда тепловыделение в топке и подача воздуха придут в соответствие с нагрузкой парогенератора, а в верхней части топки установится заданное разрежение $P_{\text{г}}$.

в) Регулирование процесса горения газомазутного парогенератора

На рис. 60 представлена структурная схема автоматического регулирования процесса горения для газомазутного парогенератора. При работе на природном газе

в случае отклонения от заданного значения давления пара $P_{\text{м}}$ в магистрали котельной в действие вступит главный регулятор ГР. Сигнал от главного регулятора воспримет регулятор топлива РТ, изменяющий подачу газа к парогенератору. Сигнал по расходу газа B , поступающего в парогенератор, подводится к регулятору топлива, который будет действовать до тех пор, пока сигнал от главного регулятора не уравнивается сигналом по

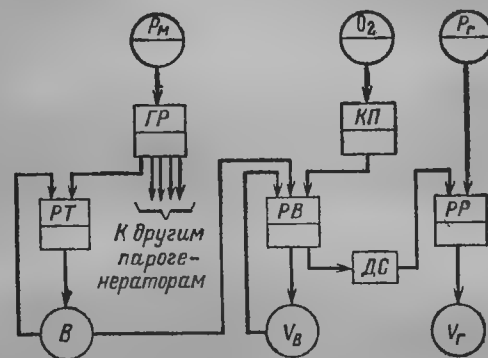


Рис. 60. Структурная схема автоматического регулирования процесса горения газомазутного парогенератора.

расходу газа. При этом парогенератор примет новую установившуюся нагрузку, соответствующую заданию главного регулятора.

Подача газа в топку регулируется клапаном, установленным на газопроводе перед парогенератором.

К регулятору воздуха РВ подводятся три сигнала: по расходу воздуха $V_{\text{в}}$, расходу природного газа B и корректирующий сигнал по содержанию кислорода O_2 в дымовых газах. В случае изменения подачи газа к парогенератору регулятор воздуха вступает в действие и приводит производительность дутьевых вентиляторов в соответствие с расходом газа. Если же нарушится воздушный режим топки, регулятор воздуха изменит производительность дутьевых вентиляторов в соответствии с сигналом от корректирующего прибора КП, контролирующего содержание кислорода O_2 в дымовых газах.

Регулятор разрежения действует так же, как и в схемах регулирования процесса горения, рассмотренных выше.

Регулирование процесса горения парогенераторов, сжигающих мазут и работающих на общую паровую магистраль, осуществляется по аналогичной схеме. Схема проста, получила очень широкое распространение. Недостаток ее в том, что в переходных режимах не обеспечивается поддержание точного соответствия между расходами топлива и воздуха. При изменении нагрузки парогенератора расход мазута изменяется практически мгновенно, а расход воздуха — с запаздыванием. Устранить этот недостаток можно, например, путем подачи на регулятор воздуха дополнительного опережающего сигнала при повышении нагрузки. При снижении нагрузки опережающий сигнал требуется блокировать, чтобы исключить неполное сгорание топлива. В качестве дополнительного воздействия могут служить исчезающие сигналы по нагрузке, расходу мазута или сигнал динамической связи от регулятора топлива.

г) Регулирование процесса горения парогенератора, работающего в блоке с турбиной

Особенность регулирования парогенератора, работающего в блоке с турбиной, состоит в том, что производительность парогенератора должна непрерывно изменяться в соответствии с колебаниями нагрузки турбины. При этом давление пара перед турбиной должно оставаться постоянным.

На рис. 61 представлена схема автоматического регулирования процесса горения парогенератора, оборудованного шаровыми мельницами и работающего в блоке с турбиной. Давление пара перед турбиной P_T поддерживается регулятором топлива PT . Сигнал по давлению пара характеризует возмущение, исходящее от турбины. Возмущения, возникающие в парогенераторе, характеризуются сигналом по скорости изменения давления в барабане dP_6/dt . Регулятор управляет подачей топлива B путем изменения частоты вращения электродвигателей пылепитателей.

Сигналом, характеризующим нагрузку парогенератора в регуляторе воздуха PB , является расход пара D

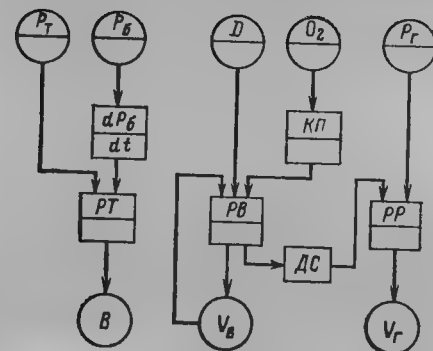


Рис. 61. Структурная схема автоматического регулирования процесса горения парогенератора, работающего в блоке с турбиной.

Дополнительно к регулятору воздуха подводится сигнал по расходу воздуха V_a и корректирующее воздействие по содержанию кислорода O_2 в дымовых газах. Регулятор разрежения PP выполняется по обычной схеме, как и для парогенераторов, работающих на общую паровую магистраль.

Часто в парогенераторах большой мощности устанавливаются двусветные экраны, разделяющие топку на две полутопки. Для такого парогенератора, работающего на угольной пыли, предусматривается раздельное регулирование подачи топлива по полутопкам в целях обеспечения экономичного его сжигания. Типовой схемой автоматического регулирования процесса горения предусматривается выравнивание тепловых нагрузок по разности содержания кислорода в дымовых газах на выходе из полутопок. Однако получить представитель-

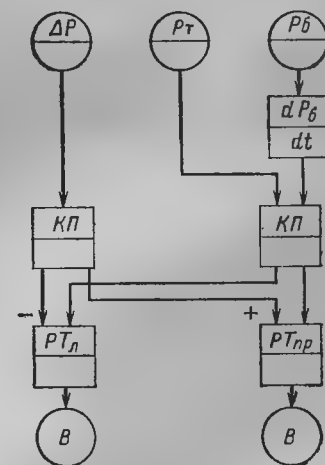


Рис. 62. Структурная схема автоматического регулирования подачи пыли по полутопкам.

ный сигнал по разности содержания кислорода с использованием газоанализаторов затруднительно из-за присущих им недостатков.

Для определения тепловых перекосов в полутопках применяется разность давлений в промежуточных коллекторах циркуляционных контуров парогенератора. На рис. 62 изображена структурная схема автоматического регулирования подачи топлива по полутопкам для парогенератора, работающего в блоке с турбиной. Один из корректирующих приборов $KП$ получает сигнал по давлению пара перед турбиной P_T и скорости изменения давления в барабане dP_6/df . Выходной сигнал этого прибора служит заданием по нагрузке для регуляторов топлива левой $РТ_л$ и правой $РТ_пр$ полутопок. Каждый регулятор топлива получает также корректирующий сигнал от прибора $KП$, воспринимающего разность давлений ΔP в промежуточных коллекторах циркуляционных контуров полутопок. Коррекция по разности давлений вводится в регуляторы топлива таким образом, что при увеличении расхода топлива B в одну из полутопок воздействие его вызывает уменьшение подачи топлива в эту полутопку и увеличение — в другую. Тем самым обеспечивается выравнивание тепловых нагрузок полутопок.

23. АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫМИ РЕГУЛЯТОРАМИ

На рис. 63 изображена принципиальная схема автоматического регулирования процесса горения барабанного парогенератора, работающего на угольной пыли в котельной с общей паровой магистралью.

В качестве главного регулятора применен электронный корректирующий прибор 1. Давление пара в магистрали измеряется манометром 2, преобразующим его в напряжение переменного тока. В корректирующем приборе усиливается сигнал, поступающий от манометра. Сигнал, появляющийся на выходе корректирующего прибора, проходит через ограничитель 3 и одновременно поступает к регуляторам топлива и воздуха.

К регулятору топлива 4, кроме сигнала от главного регулятора, подводится воздействие по тепловой нагрузке парогенератора и сигнал от датчика 8. Расход пара из парогенератора измеряется с помощью сопла 22,

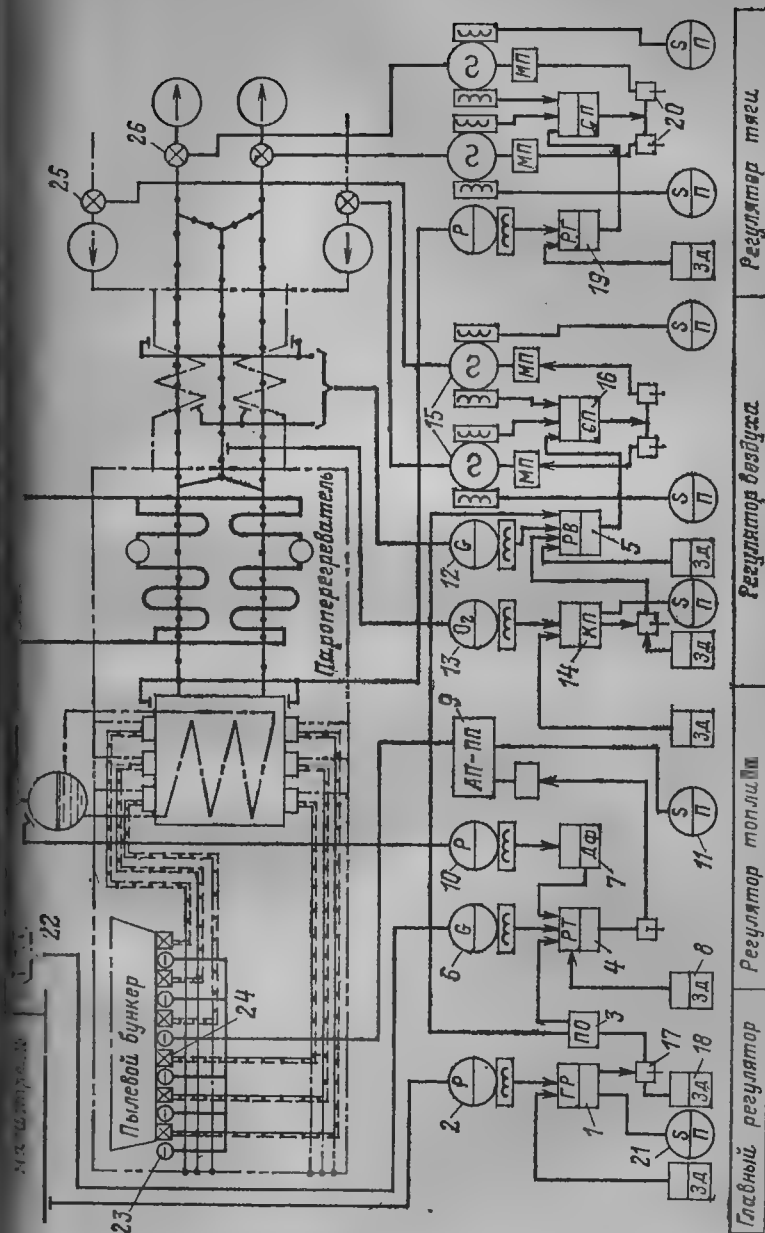


Рис. 63. Принципиальная схема автоматического регулирования процесса горения с помощью электронных регуляторов.

установленного в паропроводе. Перепад давлений на сопле воспринимается дифференциальным манометром 6, обмотки дифференциально-трансформаторного преобразователя которого питаются от измерительного блока регулятора топлива. Давление в барабане измеряется манометром 10, обмотка дифференциально-трансформаторного преобразователя которого питается от электронного дифференциатора 7. На выходе дифференциатора формируется напряжение постоянного тока, примерно пропорциональное скорости изменения давления в барабане. На выходе регулятора топлива возникает управляющее напряжение, определяемое совместным воздействием трех сигналов: от главного регулятора, по расходу пара и от электронного дифференциатора. Управляющее напряжение используется для регулирования частоты вращения пылепитателей. Частота вращения электродвигателей 23 питателей 24 регулируется с помощью системы бесступенчатого регулирования 9 типа АР—ПП. Выход регулятора топлива через переключатель подается на вход системы регулирования пылепитателей. Работа системы бесступенчатого регулирования контролируется по индикатору положения 11.

Условия экономичности процесса горения обеспечиваются регулятором воздуха 5. Измерительный блок последнего воспринимает задающий сигнал от главного регулятора, сигнал от дифференциального тягомера 12 и корректирующее воздействие по содержанию кислорода в дымовых газах. Расход воздуха, поступающего в топку, измеряется дифтягомером.

Сигнал по содержанию кислорода в дымовых газах формируется в электронном корректирующем приборе 14, измерительный блок которого получает сигнал от газоанализатора на кислород 13. Дымовые газы для анализа на кислород отбираются из трубы, соединяющей конвективную шахту с газоходом перед дымососами.

Регулятор воздуха управляет двумя исполнительными механизмами 15 типа МЭО. Выходные валы механизмов тягами связаны с приводными рычагами направляющих аппаратов 25 дутьевых вентиляторов. Поворот лопаток обоих направляющих аппаратов на одинаковый угол обеспечивается электронным переключателем 16.

Для перевода парогенератора на постоянную нагрузку (базовый режим) задающий сигнал от главного регулятора к регуляторам топлива и воздуха с помощью пе-

реключателя 17 заменяется сигналом от задатчика ручного управления 18.

Регулятором разрежения служит электронный прибор 19, получающий сигнал от дифференциального тягомера, измеряющего разрежение в верхней части топочной камеры. Регулятор воздействует на два исполнительных механизма, управляющих направляющими аппаратами 26 дымососов.

Чтобы предотвратить закрытие направляющих аппаратов дымососов и дутьевых вентиляторов при автоматическом регулировании, путевые выключатели исполнительных механизмов настраиваются на размыкание при снижении производительности тягодутьевых машин до 40—50% номинальной.

Дистанционное управление исполнительными механизмами осуществляется со щита управления с помощью ключей 20. Положение выходного вала контролируется по показаниям индикатора положения 11.

При увеличении нагрузки парогенератора регуляторы топлива и воздуха одновременно получают задание от главного регулятора. Регулятор топлива с помощью системы АР—ПП начинает повышать частоту вращения электродвигателей всех пылепитателей парогенератора, увеличивая подачу пыли в топку. Одновременно в действие вступит регулятор воздуха, который будет увеличивать производительность дутьевых вентиляторов. При этом разрежение в топочной камере уменьшится, вследствие чего регулятор разрежения увеличит производительность дымососов.

Действие регуляторов будет продолжаться до тех пор, пока парогенератор не примет новую нагрузку, соответствующую заданию от главного регулятора. При этом регулятор воздуха установит расход воздуха, соответствующий новой нагрузке парогенератора, а регулятор разрежения восстановит заданное разрежение в топочной камере.

При возникновении внутреннего возмущения, например самопроизвольном уменьшении подачи топлива пылепитателями или поступлении топлива более низкой калорийности, тепловыделение в топке снизится. Регулятор будет увеличивать подачу топлива, восстанавливая тепловыделение в топке, соответствующее заданной нагрузке. Изменять подачу воздуха при этом не требуется, так как тепловыделение в топке останется прежним.

При работе парогенератора может нарушиться воздушный режим в топке из-за присосов воздуха в топку, изменения режима работы горелок и других причин. В этом случае в действие вступит корректирующий прибор по содержанию кислорода в дымовых газах. Он будет оказывать воздействие на регулятор воздуха до восстановления заданного содержания кислорода в газах. При этом регулятор топлива в действие не вступает.

Электронная аппаратура обычно устанавливается на щите регуляторов в помещении котельной. Измерительные преобразователи размещаются в местах, удобных для обслуживания. Исполнительные механизмы типа МЭО устанавливаются вблизи регулирующих органов.

Контрольные вопросы

1. Поясните, почему необходимо регулировать нагрузку парогенератора автоматически.
2. Перечислите основные регуляторы процесса горения барабанного парогенератора.
3. Что такое внутренние и внешние возмущения парогенератора?
4. Назовите участки парогенератора как объекта регулирования давления пара.
5. Охарактеризуйте динамические свойства парогенератора по давлению пара при возмущении топливом.
6. Как формируется сигнал по тепловой нагрузке барабанного парогенератора?
7. Назовите способы косвенной оценки количества угольной пыли, поступающей в топку.
8. Как регулируется подача топлива к горелкам из промежуточного бункера?
9. В каких случаях предусматривается регулирование топлива по полутопкам?
10. Поясните назначение главного регулятора.
11. Расскажите, как работает регулятор разрежения.
12. Каким образом регулятор воздуха приводит систему в установившееся состояние при внутренних и внешних возмущениях?
13. Для чего предусматривается устройство динамической связи между регуляторами воздуха и разрежения?
14. В чем особенность регулирования нагрузки парогенератора, работающего с прямым вдуванием пыли в топку?
15. Как регулируется подача первичного воздуха в системе пылеприготовления с прямым вдуванием пыли в топку?
16. Какие сигналы подаются на вход регулятора воздуха пылеугольного парогенератора?
17. Укажите особенности схемы автоматического регулирования процесса горения парогенератора, работающего в блоке с турбиной.
18. Как осуществляется автоматическое регулирование подачи природного газа в топку?
19. Перечислите способы автоматического регулирования подачи воздуха в топку при сжигании мазута.
20. Что дает сжигание мазута с малыми и предельно малыми избытками воздуха в топке?

АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЕРЕГРЕВА ПАРА

24. ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К РЕГУЛИРОВАНИЮ ТЕМПЕРАТУРЫ ПАРА

Для обеспечения надежной и экономичной работы парогенератора и турбины необходимо поддерживать температуру пара в заданных пределах с незначительными отклонениями от номинальной. Для повышения экономичности работы теплосиловой установки температура перегрева должна поддерживаться по возможности высокой, что, однако, противоречит условиям надежной работы парогенератора и турбины. Металл труб пароперегревателя рассчитан для работы при определенной температуре. Дальнейшее повышение температуры может привести к аварии. Надежность работы турбины при повышении температуры пара также снижается, так как при этом тепловые расширения отдельных ее частей могут быть опасными. Резкое и значительное изменение температуры пара перед турбиной не может быть допущено из-за ограниченных предельных зазоров между ее частями. Кроме того, значительное понижение температуры пара перед турбиной может привести к недопустимому повышению влажности в последних ступенях расширения.

Автоматическое регулирование перегрева пара должно обеспечивать поддержание заданной температуры пара как в тракте пароперегревателя, так и на выходе из него.

Нормами установлено, что в установившихся режимах работы парогенератора отклонения температуры пара от номинальных значений не должны превышать $\pm 1\%$ в заданном диапазоне нагрузок, причем диапазон нагрузок, в котором поддерживается номинальная температура пара, определяется в зависимости от конструктивных особенностей парогенератора.

25. СВОЙСТВА ПАРОГЕНЕРАТОРА КАК ОБЪЕКТА РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЕРЕГРЕВА ПАРА

В установившемся режиме работы парогенератора температура перегрева пара зависит от распределения тепла между парогенерирующими и перегревательными

поверхностями нагрева. Это распределение зависит от режима эксплуатации: шлакования и загрязнения поверхностей нагрева, изменения температуры питательной воды, избытка воздуха, положения факела в топке, влажности топлива и др.

Шлакование и загрязнение парогенерирующих поверхностей нагрева приводят к снижению производительности парогенератора и увеличению температуры продуктов сгорания, вследствие чего перегрев пара возрастает. Загрязнение пароперегревателя уменьшает его тепловосприятие и приводит к снижению температуры перегрева пара.

Нарушения режима работы подогревателей питательной воды приводят к снижению ее температуры. При неизменной подаче топлива и понижении температуры питательной воды производительность парогенератора снижается, а температура перегрева пара возрастает. Увеличение избытка воздуха в топке связано с повышением количества продуктов сгорания, омывающих пароперегреватель. У пароперегревателей, тепловосприятие которых за счет конвекции больше, чем за счет радиации, увеличение избытка воздуха вызывает повышение температуры перегрева. Положение факела в топке зависит от тонкости помола пыли, режима работы горелок и др. Угрубление помола пыли, например, вызывает смещение факела вверх. При этом тепловосприятие парогенерирующих поверхностей нагрева уменьшается, а перегревателей поверхностей — увеличивается. Из-за этого температура перегрева повышается. Повышение влажности топлива также приводит к росту температуры перегрева, так как повышенная влажность приводит к увеличению количества продуктов сгорания, омывающих пароперегреватель.

Изменения производительности парогенератора приводят к перераспределению тепловосприятия между конвективными и радиационными поверхностями пароперегревателя, вследствие чего изменяется температура пара.

Разнообразие факторов, влияющих на температуру перегрева пара, приводит к необходимости рассчитывать поверхности нагрева пароперегревателей с запасом. При работе парогенератора излишний перегрев снимается тем или иным способом с помощью регулятора, поддерживающего заданную температуру пара.

а) Статические свойства пароперегревателя

Зависимость температуры пара $t_{пе}$ в установившихся режимах от нагрузки парогенератора D называется статической характеристикой пароперегревателя. Статическую характеристику пароперегревателя можно построить по результатам теплового расчета, выполненного для ряда нагрузок пароперегревателя.

На рис. 64 приведены статические характеристики различных пароперегревателей. Кривая 1 построена для конвективного пароперегревателя.

Температура перегрева пара резко возрастает с увеличением нагрузки, так как при этом возрастают объем, скорость и температура продуктов сгорания, омывающих пароперегреватель. Вместе с тем увеличивается доля тепла, воспринятая пароперегревателем, и температура перегрева повышается быстрее, чем нагрузка парогенератора.

Тепловосприятие радиационных поверхностей нагрева с повышением нагрузки изменяется незначительно. Однако при этом увеличивается расход пара, поэтому температура его снижается. Вследствие этого радиационный пароперегреватель имеет падающую характеристику (кривая 2).

У пароперегревателя, состоящего из конвективного и радиационного пакетов, изменения нагрузки парогенератора D_K мало сказываются на температуре перегрева пара (линия 3).

Такая характеристика пароперегревателя способствует поддержанию постоянной температуры перегрева пара, но обеспечить ее не может. Даже при постоянной нагрузке парогенератора изменение положения факела, например, может вызвать значительные отклонения температуры пара на выходе из пароперегревателя. Поэтому для обеспечения постоянной температуры пара применяется автоматическое регулирование.

б) Динамические свойства пароперегревателя

Динамической характеристикой пароперегревателя называется зависимость температу-

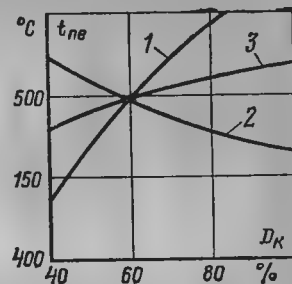


Рис. 64. Статические характеристики пароперегревателей.

ры пара от времени после нанесения возмущения. Различают три вида возмущений пароперегревателя:

- 1) изменение температуры или влажности пара на входе в пароперегреватель;
- 2) изменение температуры или количества продуктов сгорания, омывающих пароперегреватель (изменение тепловосприятости);
- 3) изменение расхода пара через пароперегреватель.

Динамические свойства пароперегревателя определяются размерами его поверхностей нагрева, режимом работы и видом возмущения. Особенностью динамических характеристик является наличие запаздывания изменения температуры пара на выходе из пароперегревателя после нанесения возмущения на входе. Величина запаздывания и постоянная времени тем больше, чем толще стенки и длина змеевиков пароперегревателя. Динамическим характеристикам при возмущении изменением температуры пара на входе в пароперегреватель свойственна значительная инерционность. При возмущении изменением тепловосприятости или расхода пара динамические характеристики менее инерционны.

Кривая разгона пароперегревателя может быть снята экспериментальным путем или приближенно построена на основании данных о его конструкции и размерах.

Расчетные разгонные характеристики используются при проектировании пароперегревателей. Они позволяют заранее определить динамические свойства пароперегревателей и, в частности, оценить правильность выбора мест установки пароохладителей в схеме пароперегревателя.

Регулировочные свойства участка пароперегревателя можно приближенно оценить по параметру K , величина которого вычисляется по формуле

$$K = \frac{\alpha_2 F_{\text{вн}}}{DC_p}, \quad (58)$$

где α_2 — условный коэффициент теплоотдачи на внутренней поверхности змеевиков, учитывающий термическое сопротивление стенки; $F_{\text{вн}}$ — внутренняя поверхность змеевиков пакета, омываемая паром; C_p — усредненная теплоемкость пара, проходящего по змеевикам; D — расход пара.

Как показали опыт и расчеты, качественное регулирование температуры пара возможно, если

$$K \leq (8 \div 10). \quad (59)$$

Расчетную разгонную характеристику участка пароперегревателя можно построить, пользуясь методикой расчета [9]. Имея расчетную разгонную характеристику, можно оценить регулировочные свойства участка па-

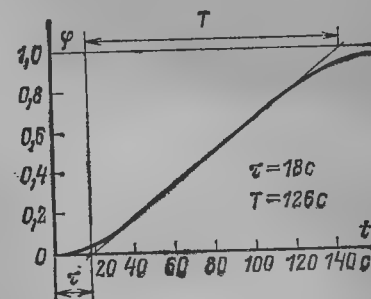


Рис. 65. Кривая разгона по температуре пара парогенератора ТПЕ-212 при возмущении расходом конденсата на впрыск.

роперегревателя. При возмущении впрыском качественное регулирование может быть достигнуто, если

$$\frac{\tau}{T} \leq (0,27 \div 0,36), \quad (60)$$

где τ — условное значение запаздывания, полученное из разгонной характеристики; T — постоянная времени.

В качестве примера на рис. 65 изображена расчетная кривая разгона по температуре пара парогенератора ТПЕ-212 при возмущении расходом конденсата на впрыск. По оси ординат отложено относительное отклонение температуры пара φ , по оси абсцисс — время в секундах. Отношение τ к постоянной времени, взятой из приведенной кривой, дает основание рассчитывать на качественное регулирование температуры перегретого пара.

Экспериментальные разгонные характеристики используются при настройке автоматических регуляторов.

26. РЕГУЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПАРА ЭЛЕКТРОННЫМИ РЕГУЛЯТОРАМИ

а) Регулирование температуры первичного пара

На рис. 66 приведена принципиальная схема автоматического регулирования температуры перегретого пара для парогенератора производительностью 220 т/ч.

Конденсат приготавливается в парогенераторе из части пара, отбираемого из барабана. В связи с этим конденсат называют «собственным».

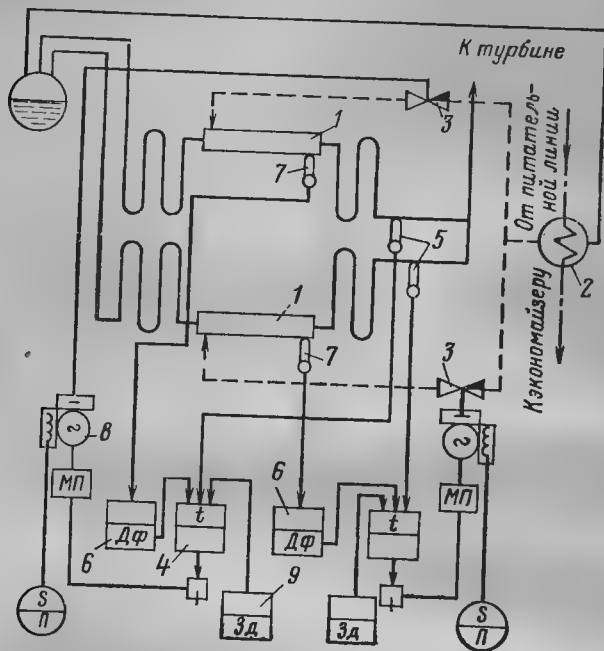


Рис. 66. Принципиальная схема автоматического регулирования температуры перегрева первичного пара с помощью электронных регуляторов.

Температура перегрева регулируется электронными регулирующими приборами 4, получающими основной

Для уменьшения влияния запаздывания, свойственного процессу перегрева, в регулятор вводится дополнительное воздействие по скорости изменения температуры пара. Это воздействие вырабатывается с помощью термометров и электронных дифференциаторов 6. Температура пара измеряется термометрами 7 на некотором расстоянии от места впрыска, на участке, где конденсат полностью превращен в пар. Температура пара на этом участке при возмущении впрыском изменяется с незначительным запаздыванием. Поэтому ввод в регулятор воздействия по скорости изменения температуры пара повышает его быстродействие и улучшает качество регулирования. С помощью магнитного пускателя МП регулятор управляет исполнительным механизмом 8, механически связанным с клапаном 3.

При снижении температуры пара на выходе из пароперегревателя в регулятор поступает основной сигнал от термометра, пропорциональный отклонению температуры. Регулятор вступит в действие и начнет прикрывать клапан. Вследствие уменьшения количества конденсата, поступающего в парохладитель, температура пара за впрыском будет повышаться, и в регулятор поступит дополнительный сигнал от дифференциатора, пропорциональный скорости повышения этой температуры.

Из-за тепловых перекосов по ширине газохода парогенератора температура пара в потоках пароперегревателя может изменяться неодинаково. Поэтому в каждом потоке пароперегревателя устанавливаются отдельные пароохладители и управляющий его работы регулятор.

Мощные парогенераторы оборудуются несколькими впрыскивающими пароохладителями, установленными по тракту пара последовательно. Конечный впрыск служит для регулирования температуры пара на выходе из пароперегревателя. Промежуточные впрыски защищают металл пароперегревателя от недопустимого повышения температуры. Схема регулятора каждого промежуточного впрыска аналогична описанной выше. Основной сигнал для регулятора отбирается в месте, наиболее опасном с точки зрения повышения температуры металла труб пароперегревателя.

б) Регулирование температуры пара промежуточного перегрева

Схемы автоматического регулирования температуры пара промежуточного перегрева выполняются в зависимости от принятого метода регулирования. В газомазутном парогенераторе производительностью 670 т/ч температура пара регулируется изменением доли продуктов сгорания, рециркулирующих в топочную камеру. В тракте промежуточного пароперегревателя предусмотрен впрыск как средство аварийной защиты от повышения температуры пара выше номинальной.

Продукты сгорания отбираются из газохода, соединяющего конвективную шахту с регенеративным воздухоподогревателем. Двумя дымососами рециркуляции они нагнетаются в нижнюю часть топочной камеры. Производительность дымососов рециркуляции регулируется направляющими аппаратами.

Промежуточный пароперегреватель (рис. 67) состоит из двух самостоятельных потоков. В рассечке каждого потока установлен пароохладитель впрыскивающего типа. На впрыск подается питательная вода, отбираемая из промежуточной ступени питательного насоса. Питательная вода подается по трубопроводу, на котором установлен клапан 1, регулирующий впрыск воды в пароохладитель. Клапан приводится в действие встроенным в его корпусе электроприводом.

В нормальном режиме работы парогенератора клапаны, регулирующие впрыск, закрыты. Они проводятся в действие в случае чрезмерного (аварийного) повышения температуры пара на выходе из промежуточного пароперегревателя.

Температура пара на выходе из каждого потока пароперегревателя измеряется измерительными термометрами 2. Сигнал от термометра поступает в преобразователь нормирующий 3. Из преобразователей сигналы подаются в измерительный блок 4, в котором формируется сигнал по усредненной температуре пара на выходе из пароперегревателя. Усредненный сигнал поступает в блок регулирующий 5. В этот же блок вводится воз-

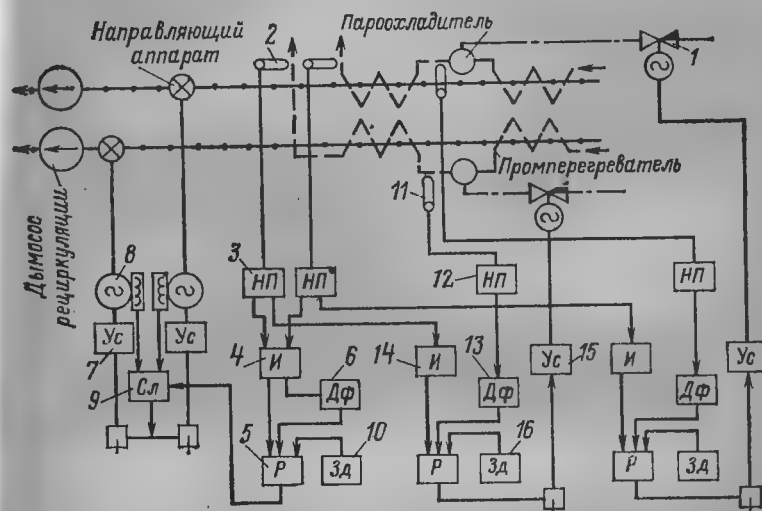


Рис. 67. Принципиальная схема автоматического регулирования температуры пара промежуточного перегрева газомазутного парогенератора.

действие по скорости изменения усредненной температуры пара, формируемое блоком дифференцирования 6. С помощью тиристорных усилителей 7 блок регулирующий управляет двумя исполнительными механизмами 8, механически связанными с направляющими аппаратами дымососов рециркуляции. Поворот лопаток обоих направляющих аппаратов на одинаковый угол обеспечивается блоком переключения 9. Регулятор настраивается на поддержание заданной температуры пара задатчиком 10.

При снижении температуры пара на выходе из промежуточного пароперегревателя в регулирующий блок поступает сигнал, пропорциональный отклонению тем-

пературы. Одновременно блок воспримет воздействие, пропорциональное скорости снижения температуры пара. Регулятор вступает в действие и начинает увеличивать производительность дымососов рециркуляции, воздействуя на их направляющие аппараты. Следствием увеличения доли рециркулирующих продуктов сгорания температура пара на выходе из пароперегревателя будет повышаться.

В новое установившееся состояние регулятор придет, когда заданная температура пара на выходе из промежуточного пароперегревателя восстановится.

Для регулирования аварийного впрыска предусмотрены два регулятора — по одному на поток. Регулятор получает основной сигнал по температуре пара на выходе из пароперегревателя и дополнительный — по скорости изменения температуры пара после впрыска. Основной сигнал поступает от преобразователя 3, дополнительный — формируется с помощью измерительного термометра 11, преобразователя 12 и дифференциатора 13. Сигналы воспринимаются измерительным блоком 14 и передаются блоку регулирующему. С помощью тиристорного усилителя 15 регулятор управляет электроприводом клапана, регулирующего впрыск воды в парохладитель. Задатчиком 16 регулятор настраивается на поддержание температуры пара, несколько повышенной в сравнении с номинальной.

Регулятор аварийного впрыска включается в работу автоматически при повышении температуры пара до установленной величины. Защищая пароперегреватель, он поддерживает повышенную температуру временно, до устранения причины, которая привела к повышению температуры пара.

Контрольные вопросы

1. Поясните факторы, влияющие на температуру перегрева пара.
2. Охарактеризуйте статические свойства пароперегревателя.
3. Изобразите примерную кривую разгона пароперегревателя и поясните ее.
4. Как осуществляется регулирование температуры перегрева пара с помощью парохладителей?
5. Поясните схему регулирования температуры перегретого пара с помощью впрыска собственного конденсата.
6. Расскажите, как работает регулятор температуры пара промежуточного перегрева, воздействующий на рециркуляцию продуктов сгорания.
7. Как используется аварийный впрыск в промежуточный пароперегреватель?

Глава шестая

АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ПРЯМОТОЧНЫХ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ

27. ОСОБЕННОСТИ ПРЯМОТОЧНОГО ПАРОГЕНЕРАТОРА КАК ОБЪЕКТА РЕГУЛИРОВАНИЯ

Система автоматического регулирования прямоточного парогенератора должна обеспечивать требуемую нагрузку, постоянство параметров перегретого пара и наиболее экономичное сжигание топлива. У прямоточного парогенератора рабочее тело под напором, создаваемым питательным насосом, последовательно проходит через все поверхности нагрева.

Водопаровой тракт прямоточного парогенератора докритического давления условно делится на три зоны: экономайзерную, парообразующую и пароперегревательную.

Конец парообразующей и начало пароперегревательной части называют переходной зоной. В переходной зоне завершается парообразование и достигается небольшой перегрев пара.

Экономайзерная зона состоит из водяного экономайзера и начального участка нижней радиационной части (НРЧ). Парообразующая зона включает большую часть НРЧ и некоторый участок средней радиационной части (СРЧ). В пароперегревательную зону входит остальная часть СРЧ, верхняя радиационная часть (ВРЧ), ширмовые пароперегреватели и конвективный пароперегреватель.

В экономайзерной зоне вода подогревается до температуры, близкой к температуре кипения, после чего она поступает в парообразующую зону, где происходит генерация пара. Насыщенный пар перемещается в пароперегревательную зону, где температура его повышается до заданной величины.

Границы экономайзерной, парообразующей и пароперегревательной зон во время работы прямоточного парогенератора не остаются неизменными. При изменениях расхода питательной воды, подачи топлива и воздуха, нагрузки и других возмущениях границы между зонами перемещаются.

Изменение расхода питательной воды влияет на производительность парогенератора, давление и темпе-

ратуру пара. Изменение подачи топлива влияет на температуру пара значительно резче, чем на барабанном парогенераторе. Практически любое возмущение на прямоточном парогенераторе влияет на температуру пара по тракту. Поэтому регулирование температуры перегрева сопряжено с трудностями и составляет одну из важнейших задач системы автоматического регулирования прямоточного парогенератора.

У барабанного парогенератора в отличие от прямоточного барабан разделяет парогенерирующую и перегревательную части водопарового тракта, и поэтому изменения расхода питательной воды практически не сказываются на производительности парогенератора и параметрах перегретого пара. Это позволяет регулировать поступление воды в барабанный парогенератор независимым регулятором.

У прямоточного парогенератора при уменьшении расхода питательной воды и неизменном расходе топлива паропроизводительность снижается. На подогрев и испарение меньшего количества воды требуется меньше тепла, поэтому экономайзерная и парообразующая зоны сокращаются, а пароперегревательная зона увеличивается. Это вызывает повышение температуры пара в тракте парогенератора как за счет уменьшения количества пара, проходящего по тракту, так и за счет увеличения пароперегревательной части тракта. При этом скорость увеличения температуры пара по мере приближения к выходу из пароперегревателя будет уменьшаться. Температура пара по тракту будет изменяться с запаздыванием, величина которого возрастает по мере приближения к выходу из пароперегревателя. Таким образом, чем ближе к выходу из парогенератора, тем больше величина запаздывания и медленнее изменение температуры пара.

Особенности изменения температуры пара при возмущении расходом питательной воды ΔW подтверждаются кривыми разгона пылеугольного парогенератора ПК-33 (рис. 68). Температура пара за средней радиационной частью (кривая 1) изменяется резче и с меньшим запаздыванием, чем за верхней радиационной частью (кривая 2).

В процессе работы прямоточного парогенератора нередко возникают возмущения топливом, вызываемые неравномерной работой пылепитателей, изменением чис-

ла включенных горелок или изменением качества топлива. Возмущения топливом приводят к значительным колебаниям температуры пара по тракту парогенератора, а также к изменениям давления и расхода пара.

Увеличение подачи топлива приводит к возрастанию тепловыделения в топке. При этом температура пара за переходной зоной, где пар перегрет незначительно, может временно снизиться («выброс» температуры). Наиболее резко это явление проявляется на прямоточных парогенераторах среднего давления.

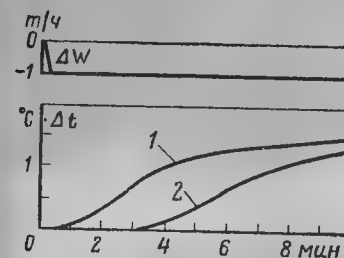


Рис. 68. Кривые разгона прямоточного парогенератора ПК-33 при возмущении расходом питательной воды.

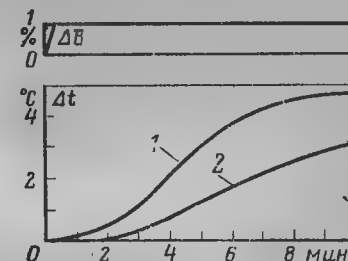


Рис. 69. Кривые разгона прямоточного парогенератора типа ПК-33 при возмущении расходом топлива.

С увеличением давления в парогенераторе явление «выброса» уменьшается за счет того, что при этом уменьшается разность в теплоемкостях пара и воды.

В качестве примера на рис. 69 показаны кривые разгона прямоточного парогенератора ПК-33 при возмущении расходом топлива. При увеличении подачи в топку топлива ΔB температура пара по тракту увеличивается. Как и при возмущении расходом питательной воды, температура пара за средней радиационной частью (кривая 1) растет быстрее, чем за верхней радиационной частью (кривая 2).

Как видно из характеристик разгона (рис. 68 и 69), для пылеугольного парогенератора ПК-33 приращение температуры пара в единицу времени при возмущении топливом больше, чем при возмущениях расходом питательной воды.

Такой же характер изменения температуры пара при возмущении топливом и расходом питательной воды сохраняется и для газомазутных прямоточных парогенера-

торов. Однако возмущения топливом при сжигании природного газа или мазута проявляются реже, так как эти топлива стабильны по теплоте сгорания, расход их легче регулировать, топливоподающие устройства практически безынерционны. При этом загрязнение парогенерирующих поверхностей нагрева при сжигании газа отсутствует, а при работе на мазуте толщина слоя загрязнений невелика. Эти обстоятельства обуславливают меньшую инерционность изменения температуры пара в газомазутном парогенераторе в сравнении с пылеугольным.

Таким образом, возмущения расходом питательной воды и топливом оказывают значительное влияние на температуру пара по тракту прямоточного парогенератора. Стабилизация температур по водопаровому тракту требует сохранения постоянного соотношения между количеством питательной воды, поступающей в парогенератор, и количеством тепла, выделяемого в топке. Это соотношение обеспечивается регуляторами топлива и питания.

Температура пара на выходе из парогенератора при возмущении расходом топлива или воды изменяется со значительным запаздыванием. Поэтому, регулируя подачу топлива или питательной воды, невозможно обеспечить поддержание температуры пара на выходе из парогенератора с необходимой точностью. Для поддержания температуры пара в тракте пароперегревателя устанавливают один или несколько пароохладителей впрыскивающего типа.

У мощных прямоточных парогенераторов водопаровой тракт состоит из двух — четырех несмешивающихся потоков. В каждом потоке устанавливается необходимое количество впрыскивающих пароохладителей для поддержания температуры пара.

На параметры пара, вырабатываемого парогенератором, влияют изменения впрыска питательной воды в пароохладители, установленные по тракту. В этом случае изменяется не только температура, но и количество пара, вырабатываемого парогенератором. При колебаниях нагрузки, подачи воздуха, температуры питательной воды параметры пара на выходе из парогенератора также изменяются.

Таким образом, прямоточный парогенератор представляет собой сложный объект регулирования с несколькими взаимно связанными параметрами.

28. АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ПЫЛЕУГОЛЬНЫХ ПРЯМОТОЧНЫХ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ

Для прямоточного парогенератора регуляторы топлива и питания выполняют ответственную задачу, поскольку температура среды в водопаровом тракте зависит от контролируемого ими соотношения расходов воды и топ-

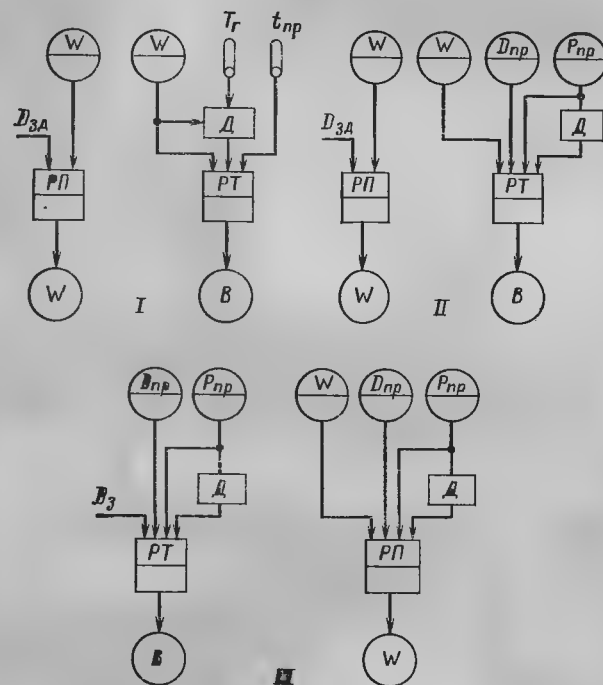


Рис. 70. Структурные схемы регуляторов питания и топлива пылеугольных прямоточных парогенераторов.

лива. Кроме того, совместное действие этих регуляторов обеспечивает требуемую нагрузку парогенератора. Поэтому оба регулятора целесообразно рассматривать совместно.

На рис. 70 изображены структурные схемы трех вариантов схем регуляторов топлива и питания пылеугольных прямоточных парогенераторов.

В основу приведенных вариантов схем положен принцип поддержания заданной температуры пара в промежуточном сечении водопарового тракта, обычно в начале перегревательной зоны, до первого по ходу пара впрыска. В таком случае этот впрыск не влияет на температуру пара в выбранном сечении.

В варианте *I* заданная температура пара $t_{\text{пр}}$ в выбранном сечении поддерживается непосредственно. В вариантах *II* и *III* поддержание заданной температуры обеспечивается косвенно.

В варианте *I* (основном) нагрузка парогенератора поддерживается регулятором питания *РП*, получающим сигнал $D_{\text{зд}}$ от регулятора нагрузки энергоблока и сигнал по расходу воды W , поступающей в парогенератор. Регулятор управляет подачей воды в парогенератор.

Для регулятора топлива *РТ* задающим сигналом служит температура пара $t_{\text{пр}}$ в промежуточном сечении водопарового тракта парогенератора. Эта температура должна поддерживаться в определенной зависимости от нагрузки парогенератора, что обеспечивается вводом в регулятор топлива сигнала по расходу воды W (нагрузке).

В регулятор топлива введены также два опережающих сигнала: по температуре газов на выходе из топочной камеры $T_{\text{г}}$ и по расходу воды в парогенератор W . Оба опережающих сигнала формируются в скоростные с помощью дифференциатора *Д*.

Сигнал по скорости изменения температуры газов повышаст быстродействие регулятора при нарушениях режима горения в топке.

Сигнал по скорости изменения расхода воды обеспечивает изменение подачи топлива одновременно с расходом воды при переходе парогенератора с одной нагрузки на другую.

Таким образом, в варианте *I* регулируемая температура контролируется непосредственно, обеспечивается быстродействие регулятора топлива и соответствие между расходами воды и топлива при изменении нагрузки парогенератора.

Основной недостаток варианта *I* связан с измерением температуры газов термометрами термоэлектрическими, которые в этих условиях оказались менее надежными, чем остальные элементы регулятора. Поэтому вместо

температуры газов применяется сигнал по температуре факела в верхней части топки. Температура факела измеряется несколькими радиационными пирометрами, включенными параллельно.

В варианте *II* нагрузка парогенератора тоже поддерживается регулятором питания, а регулятор топлива стабилизирует температуру пара в промежуточном сечении водопарового тракта или же поддерживает ее в зависимости от нагрузки парогенератора.

В регулятор топлива *РТ* поступают сигналы «по теплу» в промежуточном сечении тракта и по расходу воды в парогенератор. Сигнал «по теплу» формируется путем суммирования расхода пара в промежуточном сечении водопарового тракта $D_{\text{пр}}$ и скорости изменения давления $P_{\text{пр}}$ в этом же сечении. Кроме того, в регулятор введен сигнал по давлению $P_{\text{пр}}$ с целью компенсации влияния колебаний давления на удельный объем, а следовательно, и на расход пара.

При постоянной нагрузке парогенератора влияние нарушений топочного режима устраняется только регулятором топлива. При изменении заданной нагрузки оба регулятора практически одновременно изменяют подачу воды и топлива в парогенератор.

В варианте *III* нагрузка парогенератора поддерживается регулятором топлива, получающим задание $D_{\text{зд}}$ от регулятора нагрузки энергоблока и сигнал «по теплу» в промежуточном сечении тракта. Сигнал «по теплу» формируется так же, как и в варианте *II*. Температура пара в промежуточном сечении водопарового тракта поддерживается регулятором питания, выполненным так же, как регулятор топлива в варианте *II*.

При нарушениях топочного режима в работу вступают оба регулятора. Регулятор топлива устраняет возникшее нарушение, а регулятор питания, изменяя расход воды в соответствии с теплом в промежуточном сечении, компенсирует влияние топочного возмущения на температуру пара. Поэтому при топочных возмущениях обеспечиваются меньшие, чем в варианте *II*, отклонения температуры пара.

При изменениях нагрузки парогенератора в рассматриваемом варианте расходы топлива и воды меняются не одновременно. В первую очередь изменяется подача топлива, а затем с некоторым отставанием меняется расход воды. Из-за этого отклонения температуры пара

при колебаниях нагрузки будут большими, чем в варианте II.

Если сравнить три рассмотренных выше варианта схем, то предпочтение следует отдать варианту I, так как он обеспечивает более высокое качество регулирования температуры пара и проще в наладке.

В качестве примера на рис. 71 изображена структурная схема автоматического регулирования питания и топлива проточного парогенератора ТПП-312/А. Па-

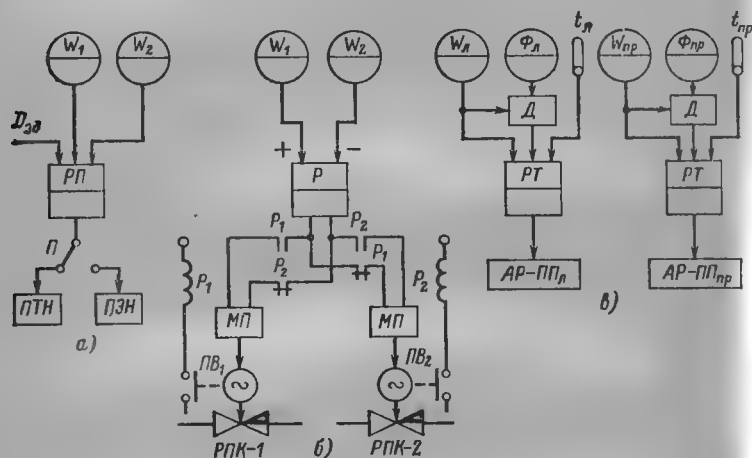


Рис. 71. Структурная схема автоматического регулирования питания и топлива парогенератора ТПП-312/А.

а — регулятор питания; б — регулятор распределения воды по потокам; в — регуляторы топлива.

рогенератор производительностью 1000 т/ч на закритические параметры пара предназначен для работы в блоке с турбиной 300 МВт. Топливом служит угольная пыль, подаваемая в горелки из промежуточного бункера. Водопаровой тракт состоит из двух несмешивающихся потоков, расположенных симметрично по сторонам топочной камеры и газоходов. Вода в парогенератор подается питательным турбонасосом (ПТН) или электронасосом (ПЭН) через два регулирующих клапана, установленных на входе в каждый поток.

Нагрузка парогенератора регулируется изменением подачи воды. Регулятор питания РП (рис. 71,а) получает задающий сигнал $D_{ад}$ от регулятора нагрузки энергоблока. Уравновешивающим сигналом служит суммар-

ный расход воды W_1 и W_2 , поступающей в парогенератор. Подача воды в парогенератор регулируется воздействием регулятора на один из питательных насосов ПТН или ПЭН. Воздействие на тот или иной насос переключается автоматически переключателем П.

Регулятором Р (рис. 71,б) вода распределяется равномерно по двум потокам парогенератора. Регулятор получает сигнал по разности расходов воды в потоках W_1 и W_2 и воздействует на регулирующий питательный клапан (РПК) одного из потоков при полностью открытом другом клапане. Переключение воздействия регулятора на тот или иной клапан осуществляется промежуточными реле P_1 и P_2 , включаемыми в электрическую цепь путевыми выключателями $ПВ_1$ и $ПВ_2$, смонтированными в исполнительных механизмах клапанов.

Если клапаны РПК-1 и РПК-2 находятся в промежуточном положении, оба путевых выключателя замкнуты. Обмотки реле P_1 и P_2 обтекаются током, и их замыкающие контакты соединяют цепи управления регулятора с магнитными пускателями МП обоих клапанов. При возникновении небаланса в расходах воды по потокам регулятор устраняет его путем открытия одного из клапанов, например РПК-1. Если при этом РПК-1 откроется полностью, разомкнутся контакты путевого выключателя $ПВ_1$. Реле P_1 обесточится и своими контактами переключит цепи воздействия регулятора с РПК-1 на РПК-2.

Теперь действие регулятора будет вызывать перемещение клапана РПК-2. При размыкании путевого выключателя $ПВ_2$ цепи воздействия регулятора снова переключаются, но уже с РПК-2 на РПК-1.

Таким образом, в процессе распределения воды по потокам регулятор воздействует на один из клапанов при полностью открытом другом. Этим достигается наименьшее дросселирование воды в РПК, а следовательно, обеспечивается большая экономичность.

Температура пара в промежуточном сечении водопарового тракта регулируется двумя регуляторами топлива РТ (рис. 71,в), схемы которых аналогичны. Основным сигналом для регулятора, управляющего подачей топлива в левую полутопку, служит температура пара после ВРЧ (t_n), измеренная в соответствующем потоке. Эта температура должна поддерживаться в определенной зависимости от нагрузки парогенератора, поэтому

в регулятор топлива введен сигнал по расходу воды $W_{\text{л}}$, характеризующий нагрузку. В регулятор введены два скоростных сигнала: по излучению факела в левой полутопке $\Phi_{\text{л}}$ и по расходу воды в потоке $W_{\text{л}}$, поверхности нагрева которого размещены слева от оси симметрии топочной камеры. Оба скоростных сигнала формируются в дифференциаторе D .

Сигнал по излучению факела повышает быстродействие регулятора при возникновении топочных возмущений. Благодаря сигналу по скорости изменения расхода воды подача топлива изменяется одновременно с расходом воды при колебаниях нагрузки парогенератора.

Рассмотренный регулятор управляет подачей топлива в левую полутопку. Он воздействует на систему бесступенчатого регулирования (AP — $ППл$), одновременно изменяющую частоту вращения пылепитателей, подающих угольную пыль к горелкам левой полутопки парогенератора.

Два регулятора топлива, предусмотренные для пылеугольного парогенератора ТПП-312/А, позволяют ликвидировать возникающие тепловые перекосы в топке и обеспечивают равномерное тепловосприятие поверхностей нагрева обоих потоков.

29. АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ГАЗОМАЗУТНЫХ ПРЯМОТОЧНЫХ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ

Автоматическое регулирование газомазутного прямооточного парогенератора проще, чем пылеугольного. Объясняется это тем, что газ и мазут стабильны по теплоте сгорания, сгорают устойчиво и расход их можно измерить. При этом расход топлива характеризует тепловыделение в топке, поэтому нет необходимости применять в схемах регуляторов сигналы по теплу или по температуре газов в топочной камере.

Для регулирования топлива и питания газомазутных прямооточных парогенераторов чаще применяются варианты схем, показанных на рис. 72. В варианте I нагрузка парогенератора $D_{\text{зд}}$ поддерживается воздействием на подачу воды. Для создания обратной связи в регулятор питания $РП$ введен сигнал по расходу воды W . Регулятор топлива $РТ$ поддерживает температуру пара $t_{\text{пр}}$ в промежуточном сечении водопарового тракта. В целях поддержания заданной зависимости температуры пара от нагрузки парогенератора в регулятор введен сигнал

по расходу воды W . В регулятор топлива также поданы скоростные сигналы по расходам воды W и топлива $G_{\text{т}}$, формируемые дифференциатором D .

Сигнал по скорости изменения расхода воды повышает быстродействие регулятора при изменениях нагрузки парогенератора.

Сигнал по скорости изменения расхода топлива обеспечивает быстрое устранение топочных возмущений.

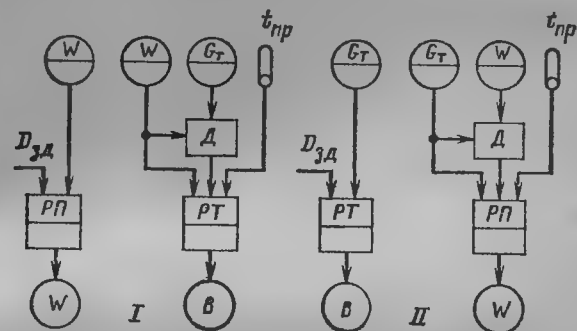


Рис. 72. Структурные схемы регуляторов топлива и питания газомазутных прямооточных парогенераторов.

В варианте II требуемую нагрузку парогенератора обеспечивает регулятор топлива $РТ$, получающий сигналы по заданной нагрузке $D_{\text{зд}}$ и расходу топлива $G_{\text{т}}$. Температура пара в промежуточном сечении тракта $t_{\text{пр}}$ поддерживается в зависимости от нагрузки парогенератора регулятором питания $РП$. В качестве сигнала, характеризующего нагрузку, используется расход топлива $G_{\text{т}}$. В регулятор питания введены те же исчезающие сигналы, что и в регулятор топлива варианта I.

Сравнивая рассмотренные выше варианты схем регуляторов, следует отметить, что вариант I обеспечивает лучшее качество поддержания температуры в промежуточном сечении водопарового тракта. Однако при этом возможны частые колебания расхода топлива даже при постоянной нагрузке парогенератора. Из-за этого поддержание малых избытков воздуха в топке затрудняется. Варианту I следует отдать предпочтение при сжигании в топке газа, так как нет необходимости сжигать его с малыми избытками воздуха.

При сжигании в топке мазута с малыми избытками воздуха целесообразно применять вариант II. Этим достигается более стабильное поддержание малых избытков воздуха в топке за счет некоторого ухудшения качества регулирования температуры пара в водопаровом тракте парогенератора.

Особенности регулирования барабанных парогенераторов, сжигающих мазут с малыми и предельно малыми избытками воздуха в топке, отмеченные выше в § 21, распространяются и на прямоточные газомазутные парогенераторы, работающие на мазуте.

В качестве примера рассмотрим систему автоматического регулирования парогенератора ТГМП-314. Производительность парогенератора 1000 т/ч при закритических параметрах пара. В топке может сжигаться природный газ или мазут. Два несмешивающихся потока водопарового тракта размещены симметрично по правой и левой сторонам топочной камеры и газоходов. Вода в парогенератор подается турбонасосом или электронасосом. На входе в каждый поток установлен регулирующий питательный клапан.

Для регулирования температуры пара в водопаровом тракте установлены четыре впрыскивающих пароохладителя: по два на поток.

Регулирование температуры пара промежуточного перегрева осуществляется воздействием на два дымососа рециркуляции продуктов сгорания. Для этой же цели в тракте промпрегревателя установлены впрыскивающие пароохладители.

Тягодутьевая установка парогенератора состоит из двух дутьевых вентиляторов и двух дымососов.

Парогенератор предназначен для работы в моноблоке с турбиной мощностью 300 МВт.

Нагрузка парогенератора регулируется изменением подачи топлива в топку. В схеме (рис. 73) предусмотрены два регулятора топлива РТ, один из которых управляет подачей газа (рис. 73,а), а другой — мазута (рис. 73,б). В каждый регулятор введены задающие сигналы $D_{зд}$. Для регулятора газа сигналом обратной связи служит расход газа G_r , для регулятора мазута — расход мазута G_m . Регулятор управляет подачей топлива, воздействуя на соответствующий клапан.

Расходом воды в парогенератор управляет регулятор питания РП (рис. 73,в). Основным сигналом для

регулятора питания служит усредненная температура пара в промежуточном сечении $t_{пр}$ водопарового тракта. Температура пара измеряется термоэлектрическим термометром в каждом потоке после ВРЧ, усредняется сумматором-усреднителем СУ, и усредненный сигнал подается в регулятор. В целях поддержания заданной зависимости температуры пара после ВРЧ от нагрузки

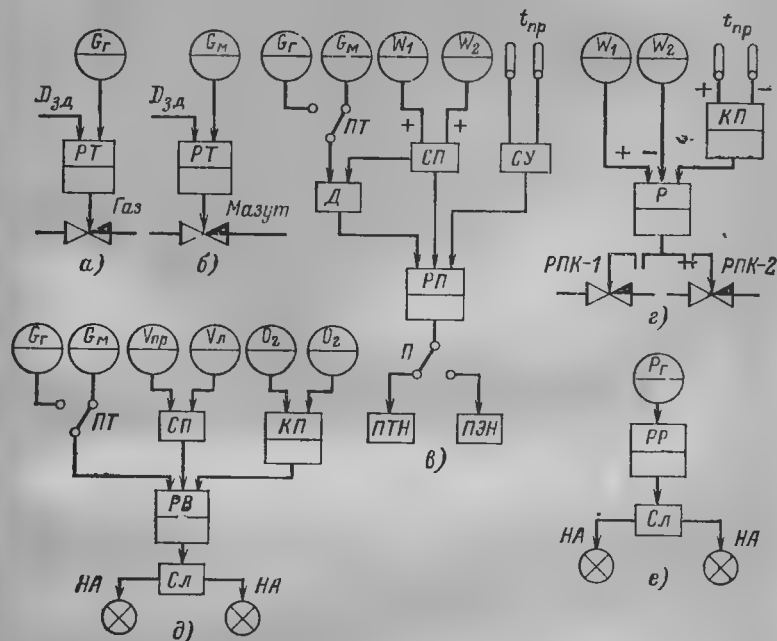


Рис. 73. Структурные схемы регуляторов горения и питания парогенератора ТГМП-314.

а — регулятор подачи газа; б — регулятор подачи мазута; в — регулятор питания; г — регулятор распределения воды по потокам; д — регулятор разрежения; е — регулятор разрежения.

парогенератора в регулятор введен сигнал по суммарному расходу воды W_1 и W_2 , получаемый с помощью прибора СП. Для повышения быстродействия регулятор питания получает упреждающие сигналы по расходу топлива (газа G_r или мазута G_m) и суммарному расходу воды. Скоростной сигнал вырабатывается дифференциатором Д. В зависимости от вида сжигаемого топлива сигнал по расходу топлива вводится в дифференциатор через переключатель топлива ПТ.

Регулятор управляет подачей воды в парогенератор, воздействуя на питательный турбонасос (ПТН) или электронасос (ПЭН). Переход с одного насоса на другой осуществляется автоматически с помощью переключателя П.

Для распределения воды по потокам предусмотрен регулятор Р (рис. 73,з), воспринимающий разность расходов воды в потоках W_1 и W_2 . В регулятор введен корректирующий сигнал по разности температур пара в потоках. Для этого температура пара в каждом потоке после ВРЧ измеряется термометром, сигнал от которого подводится к корректирующему прибору КП. Использование корректирующего прибора в схеме регулятора обеспечивает высокое качество регулирования в широком диапазоне нагрузок парогенератора.

Регулятор распределяет воду по потокам, воздействуя на один из регулирующих питательных клапанов (РПК-1 или РПК-2) при полностью открытом другом клапане. Переключение воздействия регулятора с одного клапана на другой подробно описано выше при рассмотрении аналогичного регулятора для пылеугольного прямоточного парогенератора (см. § 28).

На рис. 73,д изображена структурная схема регулятора воздуха РВ. Регулятор поддерживает заданное соотношение расходов топлива и воздуха, поступающих в топку. Расход воздуха $V_{пр}$ и $V_{л}$ измеряется в правом и левом воздухопроводах горячего воздуха, и сигналы суммируются в приборе СП. В зависимости от вида сжигаемого топлива в регулятор вводится через переключатель топлива ПТ сигнал по расходу газа G_r или мазута G_m .

Заданное соотношение расходов топлива и воздуха корректируется по содержанию кислорода в дымовых газах. Измеряется содержание кислорода O_2 в дымовых газах каждой полутопки, и с помощью корректирующего прибора КП соответствующий сигнал подается в регулятор воздуха.

Регулятор управляет подачей воздуха, воздействуя на направляющие аппараты НА двух дутьевых вентиляторов. Синфазное перемещение направляющих аппаратов обеспечивается следящим прибором СЛ.

Регулятор разрежения в топочной камере РР (рис. 73,е) получает сигнал по разрежению в верхней части топочной камеры Р_г. Регулятор поддерживает по-

стоянное разрежение, воздействуя на направляющие аппараты НА двух дымососов.

Функциональная схема регуляторов температуры пара парогенератора ТГПМ-314 изображена на рис. 74.

Основным сигналом для регулятора РТ-1 (рис. 74,а) служит температура пара на выходе из парогенератора, измеряемая термометром Т1. В регулятор введено воздействие по скорости изменения температуры пара после впрыска. Для этого сигнал по температуре пара, измеряемой термометром Т2, подается в дифференциатор

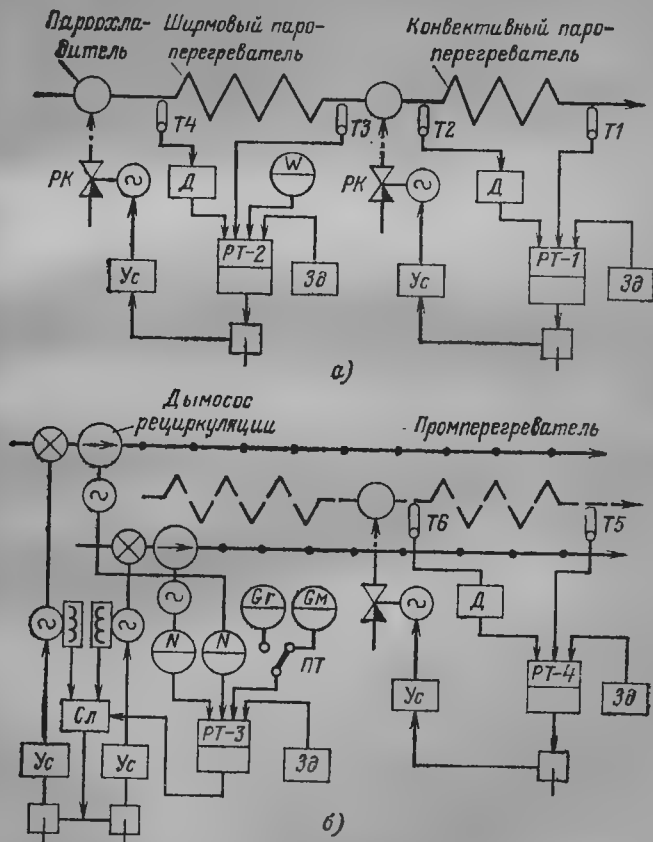


Рис. 74. Функциональная схема автоматического регулирования температуры пара парогенератора ТГПМ-314.

а — регуляторы температуры первичного пара; б — регуляторы температуры пара промежуточного перегрева.

Д, который формирует воздействие по скорости изменения температуры пара. Выходной сигнал регулятора с помощью тиристорного усилителя $У_c$ управляет перемещением регулирующего клапана РК. Регулятор поддерживает заданную задатчиком $Зд$ температуру пара на выходе из парогенератора, воздействуя на количество питательной воды, впрыскиваемой в пароохладитель.

Схема регулятора РТ-2 отличается от рассмотренной тем, что в нее дополнительно введен сигнал по расходу воды W в потоке. Основным сигналом для регулятора служит температура пара на выходе из ширмового пароперегревателя, измеряемая термометром ТЗ. Регулятор поддерживает эту температуру в зависимости от нагрузки парогенератора, которая характеризуется сигналом по расходу воды W в потоке.

На рис. 74,а изображены регуляторы температуры первичного пара для одного потока, для второго потока они выполнены аналогично.

Регулятор рециркуляции продуктов сгорания РТ-3 (рис. 74,б) получает сигнал по расходу топлива: газа G_r или мазута G_m . Нужный сигнал вводится в регулятор переключателем топлива ПТ. Уравновешивающим сигналом для регулятора служит мощность N , потребляемая электродвигателями дымососов рециркуляции. Регулятор воздействует на два направляющих аппарата дымососов. Синфазное перемещение направляющих аппаратов обеспечивается следящим прибором Сл.

Регулятор изменяет производительность дымососов рециркуляции в заданной зависимости от нагрузки парогенератора, характеризующей расходом топлива. Тем самым косвенно поддерживается температура пара промежуточного перегрева.

Следует отметить, что воздействие на рециркуляцию продуктов сгорания приводит не только к изменению температуры пара промперегрева. Одновременно изменяются температура первичного пара. Из-за этого в регуляторе рециркуляции не применяется сигнал, непосредственно характеризующий температуру пара промежуточного перегрева.

В каждом потоке тракта промперегревателя предусмотрен регулятор аварийного впрыска РТ-4.

В регулятор введен сигнал по температуре пара на выходе из промперегревателя, измеряемой термометром Т5. С помощью дифференциатора Д в регулятор посту-

пает воздействие по скорости изменения температуры пара после впрыска, измеряемой термометром Т6.

При повышении температуры пара промперегрева на выходе из парогенератора до заданного значения регулятор включается в работу автоматически. Он поддерживает предельную температуру пара, воздействуя на расход воды, впрыскиваемой в пароохладитель (аварийный впрыск).

Контрольные вопросы

1. Как влияют возмущения топливом и водой на температуру пара в тракте прямоточного парогенератора?
2. В чем различие регулирования температуры пара в тракте пылеугольного и газомазутного прямоточных парогенераторов?
3. Каким образом обеспечивается косвеинное поддержание температуры пара в промежуточном сечении тракта?
4. Какие сигналы используются для повышения быстродействия регулятора топлива?
5. Пользуясь схемой, сравните три варианта регуляторов топлива и питания пылеугольного прямоточного парогенератора.
6. Пользуясь схемой, расскажите, как распределяется вода по двум потокам в парогенераторе.
7. Сравните варианты схем регуляторов топлива и питания газомазутного парогенератора.
8. Какие сигналы используются для регулятора воздуха газомазутного парогенератора?
9. Как регулируется температура пара в тракте пароперегревателя?
10. Как используется рециркуляция продуктов сгорания для регулирования температуры пара промперегрева?

Глава седьмая

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ЗАЩИТЫ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ

30. ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ЗАЩИТАМ ПАРОГЕНЕРАТОРНЫХ УСТАНОВОК

В связи с широким внедрением автоматического регулирования основных процессов управление работой парогенератора было сосредоточено на групповом или блочном щитах управления, что позволило сократить численность обслуживающего персонала. Это вызвало необходимость принятия специальных мер для обеспечения надежной и безопасной работы оборудования. С этой целью широко внедряется технологическая защита парогенератора, предназначенная для предотвраще-

ния возникновения и развития аварии при нарушении нормального режима работы.

Нарушения нормального режима работы парогенератора сопровождаются отклонениями регулируемых параметров, что и используется для включения защит в работу. Значение параметра, при котором защита приводится в действие, называется уставкой срабатывания. Срабатыванию защиты часто предшествует подача светового и звукового сигнала на щит управления. Сигналы подаются также одновременно с включением в действие защиты.

Действие защиты чаще всего одностороннее: отключенное защитой оборудование после устранения причин ее срабатывания включается в работу дежурным персоналом.

Устройство технологической защиты должно обладать высокой надежностью, которая характеризуется числом отказов в срабатывании и количеством ложных срабатываний.

При нормальной работе оборудования устройства технологических защит длительно бездействуют. Однако они должны безотказно сработать в любой момент при нарушениях нормальной работы парогенератора или его оборудования. Отказ срабатывания защиты, как правило, приводит к повреждению оборудования и увеличению длительности его послеаварийного ремонта. Поэтому отсутствие отказов действия защиты характеризует высокую надежность ее устройств.

Ложное срабатывание защиты тоже влечет за собой убытки, связанные с недовыработкой пара парогенератором и необходимостью повторного пуска оборудования. Поэтому защита не должна допускать ложные срабатывания.

Надежность защиты в значительной мере определяется количеством, схемой включения и надежностью используемых в ней приборов.

По своему действию защиты разделяются на действующие на останов парогенератора; снижающие нагрузку парогенератора; выполняющие локальные операции.

31. ЗАЩИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

В схемах технологических защит используются показывающие и самопишущие приборы теплотехнического контроля, имеющие контакты, замыкающиеся при дости-

жении заданного предельного значения контролируемой величины.

Для повышения надежности защиты наиболее ответственные величины контролируются двумя, а иногда и тремя приборами, контакты которых соединяются последовательно или параллельно.

Последовательное включение контактов показано на рис. 75,б. Такая схема применяется в защите, ложное срабатывание которой может нанести значительный ущерб, например в защите, действующей на останов парогенератора. При последовательном соединении контактов защита срабатывает лишь в том случае, если замыкаются контакты обоих приборов. Такая схема получила название «два из двух».

Для некоторых защит важно обеспечить безотказность срабатывания, поэтому контакты приборов соединяются параллельно (рис. 75,а). Защита срабатывает при замыкании контактов I или II. Иногда в цепь защиты включаются контакты трех приборов, так чтобы срабатывание произошло при замыкании контактов любых двух приборов (рис. 75,в), поэтому схема получила название «два из трех». Замыкание контактов ставит под напряжение обмотку реле P, включенного в цепь защиты.

К числу устройств, специально предназначенных для защиты парогенераторов, принадлежат импульсно-предохранительное устройство и автомат типа АЗК-4.

а) Импульсно-предохранительное устройство

Для защиты парогенератора при повышении давления пара сверх допустимого используется импульсно-предохранительное устройство.

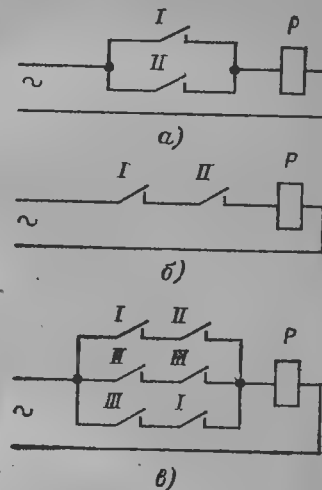


Рис. 75. Схемы включения контактов приборов защиты. а — параллельная; б — последовательная; в — включение трех приборов по схеме «два из трех».

Комплект импульсно-предохранительного устройства (рис. 76) состоит из следующих основных элементов: главный предохранительный клапан 1, импульсный клапан 2 и электроконтактный манометр 3.

Главный предохранительный клапан имеет поршневую камеру, в которую при открытии импульсного клапана подается пар. Под действием усилия, развиваемого давлением пара, поршень 4 перемещается вниз и открывает клапан 5, сбрасывая пар в атмосферу.

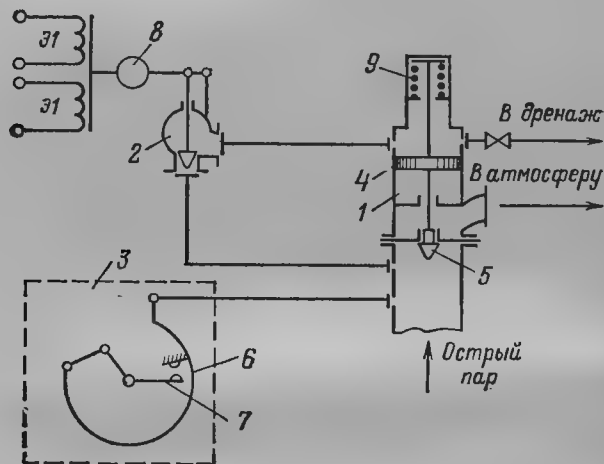


Рис. 76. Схема импульсно-предохранительного устройства.

Импульсный клапан открывается электромагнитом 31. Электромагнит 32 удерживает клапан в закрытом положении.

Электромагнит 31 включается электроконтактным манометром, манометрическая трубчатая пружина 6 которого связана с контактной системой 7.

При нормальном давлении пара электромагнит 32 обтекается током и помогает грузу 8 держать импульсный клапан плотно закрытым.

При повышении давления пара до установленного предела контактная система манометра срабатывает и электромагнит 32 обесточивается, а 31 — включается под напряжение. Под действием повысившегося давления и усилия со стороны 31 импульсный клапан откро-

ется и заставит сработать главный предохранительный клапан, сбрасывающий пар в атмосферу.

После снижения давления до заданного значения контактная система манометра снова включит под напряжение электромагнит 32. Импульсный клапан закроет доступ пара в поршневую камеру главного клапана, и последний под действием пружины 9 закроется.

Для защиты от повышения давления первичного пара главные предохранительные клапаны обычно устанавливаются на выходном коллекторе пароперегревателя. Такое размещение клапанов обуславливается необходимостью охлаждения труб пароперегревателя при открытии клапана и сбросе пара в атмосферу.

Защита тракта промежуточного перегрева обеспечивается предохранительными клапанами, которые зачастую устанавливаются на паропроводе, по которому пар от турбины поступает в пропариватель парогенератора.

б) Автомат типа АЗК-4

Автомат типа АЗК-4 предназначен для включения мазутных форсунок в случаях потускнения (уменьшения яркости) пылевого факела в топке и для останова парогенератора при погасании факела. В комплект автомата входят два измерителя интенсивности свечения факела, релейный шкаф и клапаны с электромагнитными приводами.

Интенсивность свечения факела измеряется с помощью фоторезисторов. В корпусе измерителя интенсивности свечения размещены четыре фоторезистора, соединенные параллельно. Измеритель устанавливается так, чтобы световой поток факела топки падал на фоторезисторы.

Принципиальная электрическая схема автомата показана на рис. 77. При потускнении факела в топке световой поток, падающий на фоторезисторы ФС, становится меньше, проводимость фоторезисторов уменьшается. Ток в обмотках реле 1РП, 2РП и 3РП уменьшается. Реле настроены так, что при этом отпускается сердечник только реле 1РП. Kontakтами 1РП₁ и 1РП₂ включается реле времени 1РВ, действующее с выдержкой времени от 0,5 до 9 с. Выдержка времени выбирается так, чтобы при пульсациях факела форсунки не включались. При срабатывании реле 1РВ контактами

1РВ₁ к сети подключается обмотка реле 4РП и контактами 4РП₁ и 4РП₂ включает магнитный контактор 1К. Реле 4РП самоблокируется контактами 4РП₃. При срабатывании контактора 1К на обмотки электромагнитных приводов мазутных клапанов подается питание и форсунки включаются в работу.

При срабатывании контактора 1К блок-контакты 1К₁ включают реле 5РП, которое контактами 5РП₁ включает реле времени 3РВ. Одновременно размыкаются контакты 5РП₂ и 5РП₃.

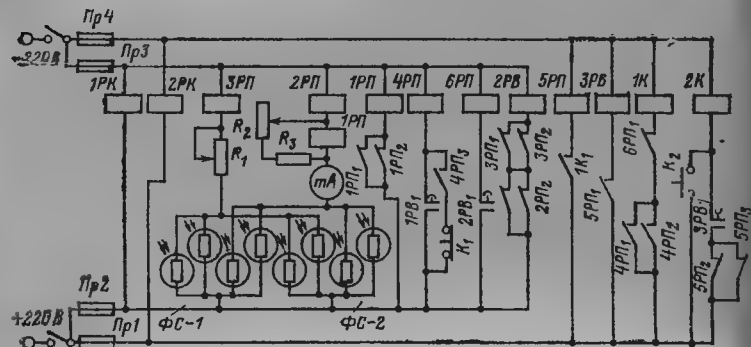


Рис. 77. Принципиальная электрическая схема автомата типа АЗК-4

После восстановления факела в топке мазутные форсунки дистанционно отключаются кнопкой К₁.

Реле 3РВ с диапазоном выдержки времени 4,5—12 с обеспечивает продувку форсунок паром после отключения. Для этого в схему включен контактор 2К, подающий питание на обмотки электромагнитных приводов паровых клапанов. Обмотка контактора 2К получает питание через контакты 5РП₂, 5РП₃ и 3РВ₁ после отключения контактора 1К. Для дистанционного управления продувкой форсунок паром предусмотрена кнопка К₂.

В случае погасания факела в топке ток, протекающий через фоторезисторы, резко уменьшится, что вызовет отпадение якорей реле 1РП, 2РП, 3РП и включение реле времени 1РВ и 2РВ. Если выдержка времени реле 1РВ меньше, чем у 2РВ, то схема работает так же, как и в случае потускнения факела, включая мазутные форсунки. Если факел при этом не восстанавливается, то

по истечении выдержки времени реле 2РВ контактами 2РВ₁ включит реле 6РП, отключающее контактами 6РП₁ контактор 1К. Мазутные форсунки отключаются, и подается сигнал на останов парогенератора.

В схеме автомата предусмотрен ряд защит от ложных срабатываний.

В случае выхода из строя одного из двух измерителей автомат не может остановить парогенератор, так как для срабатывания реле времени 2РВ нужно, чтобы замкнулись контакты двух реле 2РП и 3РП. Перегорание предохранителей сигнализируется с помощью реле 1РК и 2РК.

Описываемый автомат применяется для управления мазутными форсунками с механическим распыливанием. При установке на парогенераторе форсунок с паровым распыливанием применяется другая модификация автомата, в схеме которого отсутствует реле времени 3РВ.

Паровые и мазутные клапаны в этом случае открываются одновременно контактором 1К.

32. ЗАЩИТЫ БАРАБАННОГО ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ПАРОГЕНЕРАТОРА

На рис. 78 изображена структурная схема технологической защиты барабанного парогенератора, оборудованного системой пылеприготовления с промбункером и работающего на общую паровую магистраль котельной. Парогенератор оснащен двумя дутьевыми вентиляторами и двумя дымососами.

а) Защиты, действующие на останов парогенератора

Обычно уровень в барабане поддерживается в заданных пределах автоматическим регулятором. При отказе регулятора, а также при неправильных действиях оператора, управляющего питательным клапаном дистанционно, значительное отклонение уровня может привести к перепитке котла водой или упуску воды из барабана.

При упуске воды из барабана уровень воды в нем понижается, вследствие чего может быть нарушена циркуляция и вызван перегрев труб топочных экранов. Срабатывание защиты должно предотвратить нарушение циркуляции в трубах топочных экранов.

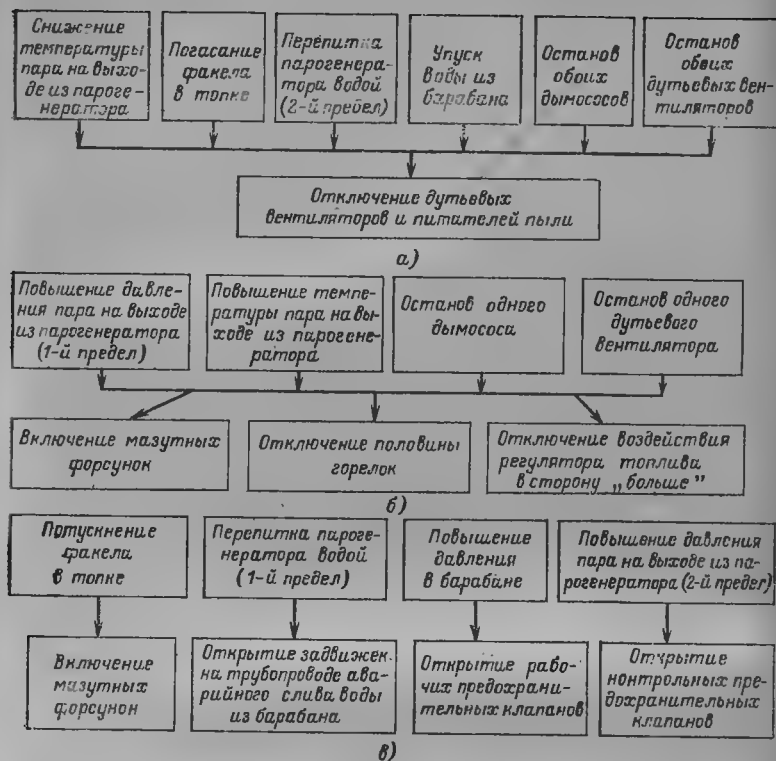


Рис. 78. Структурная схема технологических защит барабанного пылеугольного парогенератора.

а — защиты, действующие на останов парогенератора; б — защиты, снижающие нагрузку парогенератора; в — защиты, выполняющие локальные операции.

Повышение уровня в барабане при перепитке парогенератора может привести к забросу воды в пароперегреватель и снижению температуры перегрева пара.

Защита при перепитке парогенератора имеет две ступени срабатывания.

При повышении уровня воды в барабане до первого предела защита открывает две задвижки, последовательно установленные на трубопроводе аварийного слива воды из барабана (локальная операция). Если при этом уровень в барабане снизится за пределы уставки срабатывания, то защита подает сигнал на одновремен-

ное закрытие обеих задвижек. Таким образом, действие этой защиты двустороннее.

Если же уровень в барабане по каким-либо причинам продолжает повышаться и достигает второго, более высокого предела, защита останавливает парогенератор.

Значительное понижение температуры перегретого пара представляет опасность для турбины. Поэтому предусматривается защита, останавливающая парогенератор в случае понижения температуры пара до заданного предела. При работе парогенератора в моноблоке с турбиной защита от понижения температуры пара предусматривается на турбине.

При уменьшении нагрузки парогенератора интенсивность горения в топке снижается. Горение становится неустойчивым и может прекратиться.

В связи с этим на пылеугольных парогенераторах предусматривается защита, действующая при потухании и погасании факела в топке. Эта защита имеет две ступени срабатывания. Для осуществления ее применяется автомат типа АЗК-4. При потухании факела автомат включает обычно две мазутные форсунки. В парогенераторе с топкой, разделенной двусветным экраном, автоматически включаются мазутные форсунки каждой полутопки.

Включение мазутных форсунок повышает интенсивность горения в топке. После восстановления процесса горения мазутные форсунки отключаются дежурным персоналом. Может оказаться, что включение мазутных форсунок не приведет к восстановлению нормального горения и факел погаснет. В этом случае подача угольной пыли в топку должна быть прекращена во избежание взрыва. Для этого в действие вступает защита при погасании факела, останавливающая парогенератор.

При выходе из строя обоих дутьевых вентиляторов или обоих дымососов защита также останавливает парогенератор.

Для останова парогенератора защита одновременно отключает дутьевые вентиляторы и питатели пыли, прекращая подачу в топку топлива и воздуха. Последующие операции по останову парогенератора (отключение механизмов, закрытие задвижек и др.) выполняются системой технологических блокировок. Дымососы сохраняются в работе. После вентиляции топки и газоходов парогенератора они отключаются персоналом.

б) Защиты, действующие на снижение нагрузки парогенератора

Повышение давления или температуры пара на выходе из парогенератора за допустимые пределы опасно по условиям прочности паропроводов. Предусматриваются защиты, действующие в случае повышения давления или температуры пара до заданных уставок и переводящие парогенератор на пониженную нагрузку. Понижение нагрузки парогенератора приводит к снижению давления и температуры пара, и парогенератор может быть сохранен в работе.

При выходе из строя одного из двух дымососов или дутьевых вентиляторов парогенератор также должен быть переведен на пониженную нагрузку.

Пониженная нагрузка, на которую защиты переводят парогенератор в перечисленных случаях, составляет 50—60% номинальной. Для этого защита отключает половину питателей пыли и отключает воздействие регулятора топлива в сторону увеличения подачи пыли.

Значительное снижение нагрузки парогенератора часто сопровождается нарушением устойчивости процесса горения. Поэтому одновременно со снижением нагрузки парогенератора включаются мазутные форсунки.

в) Защиты, выполняющие локальные операции

К числу защит, выполняющих локальные операции, относятся защиты при потускнении факела и первая ступень защиты при перепитке парогенератора водой. К ним же относятся защиты, действующие при повышении давления пара, осуществляемые предохранительными клапанами. Различают контрольные и рабочие предохранительные клапаны. Контрольные клапаны срабатывают при повышении до установленного предела давления пара на выходе из парогенератора. При повышении давления в барабане срабатывают рабочие предохранительные клапаны. Главные предохранительные клапаны открываются в определенной последовательности. Сначала должны открыться контрольные клапаны, настроенные на срабатывание при меньшем отклонении давления пара. В случае дальнейшего повышения давления пара срабатывают рабочие клапаны.

33. ЗАЩИТЫ БАРАБАННОГО ГАЗОМАЗУТНОГО ПАРОГЕНЕРАТОРА

На рис. 79 представлена структурная схема технологической защиты газомазутного барабанного парогенератора производительностью 420 т/ч, оснащенного шестью горелками, в которых можно отдельно сжигать природный газ или мазут. Воздух подогревается в двух вращающихся регенеративных воздухоподогревателях. Парогенератор оборудован двумя дутьевыми вентиляторами и двумя дымососами.

Большая часть защит газомазутного парогенератора выполнена так же, как и защиты пылеугольного парогенератора. К ним относятся защиты по температуре и давлению пара, по уровню в барабане и выходу из строя тягодутьевых машин. Так как газ и мазут при пониженных нагрузках горят устойчиво, защита при потускнении факела в топке газомазутного парогенератора не предусматривается. Для этого парогенератора дополнительно выполняются защиты при понижении давления газа и мазута перед горелками (рис. 79,а).

Значительное снижение давления газа приводит к затягиванию факела в амбразуру горелки и ее обгоранию; обрыв подачи газа может привести к образованию в топке взрывоопасной смеси. Поэтому защита при понижении давления газа перед горелками выполняется действующей на останов парогенератора путем одновременного выполнения ряда операций, в числе которых закрытие запорных органов на газопроводе перед парогенератором и у каждой горелки. Аналогично действует защита при понижении давления воздуха перед горелками (при сжигании газа).

При понижении давления мазута перед форсунками распыливание ухудшается либо прекращается вовсе. При этом мазут будет скапливаться в нижней части топки, что может привести к взрыву. Для предотвращения этого предусмотрена защита, останавливающая парогенератор при понижении давления мазута перед форсунками до заданного предела. При этом закрываются задвижки на мазутопроводе перед парогенератором и у каждой горелки. Парогенератор останавливается защитами также при отключении обоих вращающихся регенеративных воздухоподогревателей.

Операции по останову парогенератора выполняются системой технологических блокировок. При этом дымо-

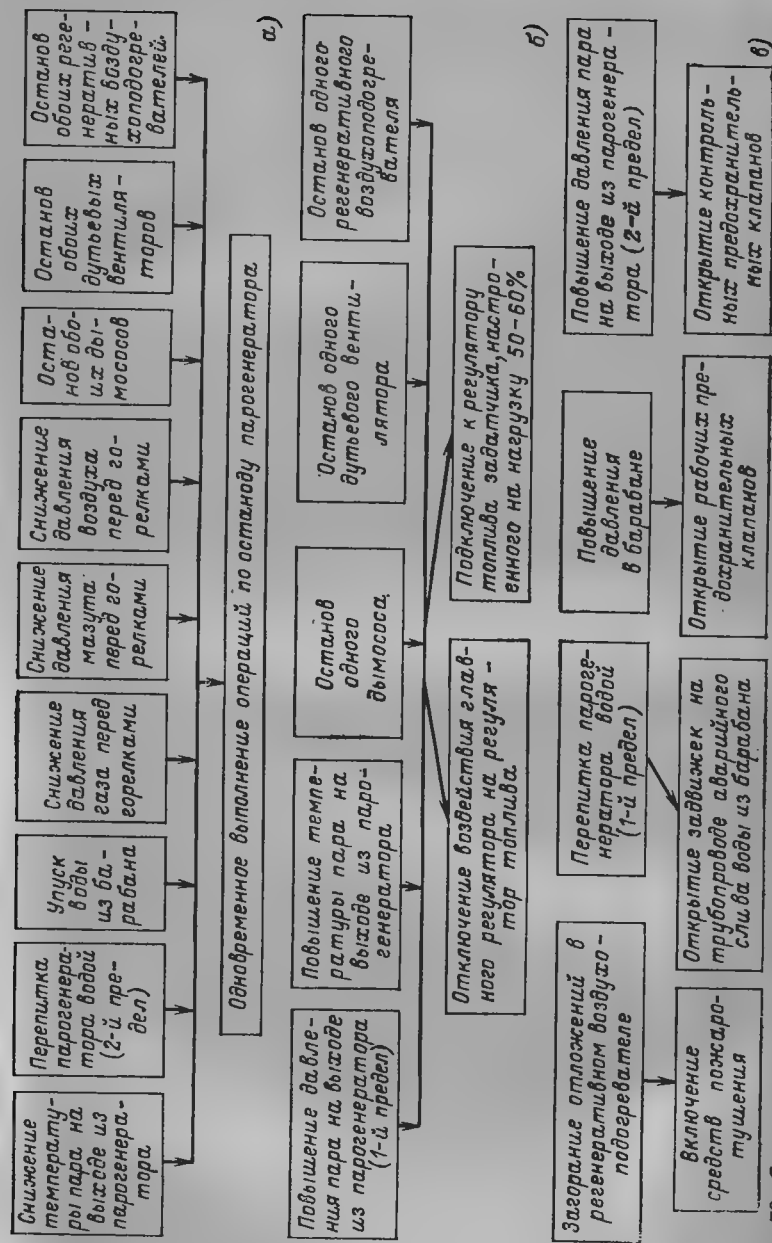


Рис. 79. Структурная схема технологических защит газомазутного барабанного парогенератора. а — защиты, действующие на останов парогенератора; б — защиты, снижающие нагрузку парогенератора; в — защиты, выполняющие

сосы и дутьевые вентиляторы сохраняются в работе для вентиляции топки и газоходов парогенератора. Они отключаются обслуживающим персоналом.

В сравнении с пылеугольным парогенератором защиты, действующие на снижение нагрузки газомазутного парогенератора (рис. 79,б), дополнены защитой при останове одного регенеративного воздухоподогревателя. Защиты, выполняющие локальные операции (рис. 79,в), дополнены защитой при загорании отложений в регенеративном воздухоподогревателе. Это необходимо из-за того, что при некоторых режимах на поверхностях воздухоподогревателя накапливаются отложения, которые могут загореться и вывести из строя воздухоподогреватель.

Сигналом для срабатывания этой защиты служит уменьшение разности температур дымовых газов до воздухоподогревателя и воздуха после воздухоподогревателя.

При загорании отложений защита включает средства пожаротушения, открывая запорные органы на подводе пара и воды к воздухоподогревателю.

34. ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЗАЩИТ ПРЯМОТОЧНОГО ПАРОГЕНЕРАТОРА

Современные прямоточные парогенераторы сверхкритических параметров пара предназначены для работы в энергоблоках с турбинами. Значительная часть этих парогенераторов сжигает природный газ и мазут.

Рассмотрим структурную схему технологических защит газомазутного прямоточного парогенератора (рис. 80). Значительная часть защит выполняется одинаково для барабанных и прямоточных парогенераторов. Сюда относятся защиты при остановах тягодутьевых машин и регенеративных воздухоподогревателей, а также при нарушениях подачи газа, мазута и воздуха (при сжигании газа) в топку (рис. 80,а).

Для прямоточного парогенератора должна быть обеспечена постоянная подача питательной воды. Поэтому предусматривается защита при прекращении поступления питательной воды. Защита выполняется по схеме «два из двух». При прекращении поступления воды в любой из потоков водопарового тракта защита действует на останов парогенератора с выдержкой времени, необхо-

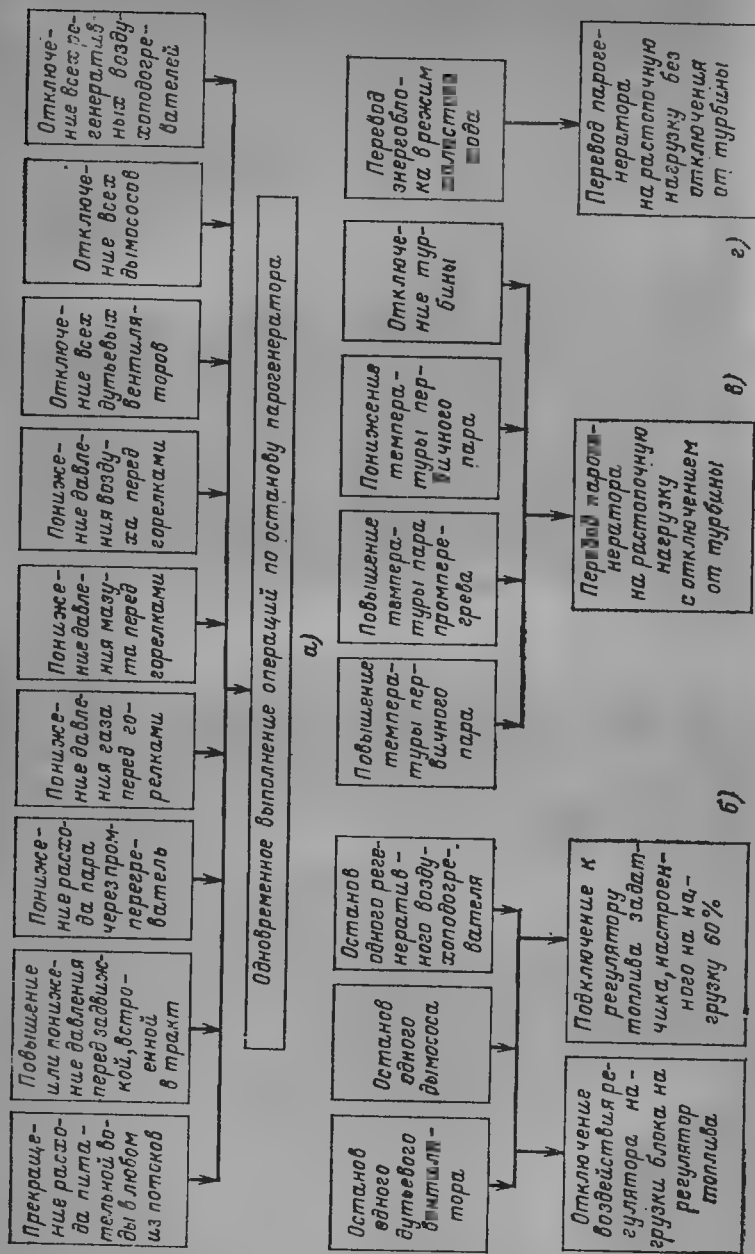


Рис. 80. Структурная схема технологических защит газомазутного прямоточного парогенератора. а — защиты, действующие на останов парогенератора; б — защиты, снижающие нагрузку парогенератора; в — защиты, действующие на отключение от турбины; г — защиты, действующие на перевод парогенератора на дистанционную нагрузку без отключения от турбины.

димой для предотвращения останова его в случае перехода с основного на резервный насос.

В водопаровом тракте прямоточного парогенератора, работающего на закритических параметрах, устанавливается задвижка, используемая при пуске и при работе парогенератора на малых нагрузках. При работе парогенератора должны быть выдержаны допустимые колебания давления в тракте до встроенной задвижки. Нижний предел давления устанавливается по условиям обеспечения работы этой части тракта при закритических давлениях среды; верхний предел давления определяется из условий прочности поверхностей нагрева парогенератора. Для обеспечения этих условий парогенератор оборудован защитами, останавливающими его при повышении или понижении давления перед задвижкой, встроенной в водопаровой тракт. Отказ срабатывания защиты по повышению давления может привести к очень тяжелым повреждениям парогенератора. Поэтому давление перед встроенной задвижкой контролируется двумя независимыми приборами, контакты которых включаются параллельно. В результате вероятность отказа этой защиты значительно уменьшается.

Для защиты промежуточного пароперегревателя предусматривается останов парогенератора защитой в случае прекращения расхода пара через пароперегреватель. Сигналом для срабатывания защиты служит перепад давлений на промежуточном пароперегревателе, контролируемый двумя приборами, контакты которых соединяются последовательно. Защита действует с выдержкой времени, исключающей случайный останов парогенератора.

Останов парогенератора защитой осуществляется путем прекращения подачи топлива в топку. Для этого закрываются запорные вентили на трубопроводах подачи топлива к каждой из горелок, а также отсечной клапан и задвижка на подводе топлива к парогенератору. Другие операции по останову парогенератора выполняются системой технологических блокировок. Дымососы и дутьевые вентиляторы сохраняются в работе для вентиляции топки и газоходов. Они отключаются обслуживающим персоналом.

Для прямоточного парогенератора предусматривается ряд защит, действующих на снижение нагрузки. Сюда относятся защиты при отключении одной из тягодутье-

вых машин, при останове одного из регенеративных воздухоподогревателей (рис. 80,б). Эти защиты действуют на снижение нагрузки до 60% номинальной. Для этого отключается воздействие регулятора нагрузки блока на регулятор топлива и к последнему подключается задатчик, настроенный на нагрузку 60%.

Защиты при повышении и понижении температуры первичного пара, а также при повышении температуры пара промежуточного перегрева (рис. 80,в) выполняются по схеме «два из двух» для каждого из потоков водопарового тракта. Защиты при повышении температуры пара действуют с выдержкой времени, достаточной для проведения мероприятий по понижению температуры пара. При понижении температуры первичного пара защита действует без выдержки времени, так как она срабатывает при температуре, значительно меньшей номинальной. При отключении турбины защита также действует на снижение нагрузки парогенератора.

Температурные защиты и защита при отключении турбины автоматически переводят парогенератор на растопочную нагрузку, составляющую 30% номинальной. При этом парогенератор отключается от турбины и пар, вырабатываемый им, сбрасывается в конденсатор турбины с помощью быстродействующей редуционно-охладительной установки (БРОУ).

В случае перевода энергоблока в режим холостого хода парогенератор защитой переводится на растопочную нагрузку без отключения от турбины (рис. 80,г). В этом режиме парогенератор также несет 30%-ную нагрузку. Часть пара потребляется турбиной, а остальной пар сбрасывается в конденсатор с помощью БРОУ.

На прямоточном парогенераторе предусматриваются обычные защиты (на рис. 80 не показаны), действующие при повышении давления первичного пара и пара промежуточного перегрева, загорании отложений в регенеративном воздухоподогревателе и т. п.

Контрольные вопросы

1. В чем состоит назначение защиты парогенератора?
2. Что называется уставкой срабатывания защиты?
3. Охарактеризуйте показатели надежности устройств защиты.
4. Поясните схему включения контактов «два из двух».
5. Расскажите принцип действия импульсно-предохранительного устройства.
6. Как используется автомат типа АЗК-4 для защиты парогенератора?

7. Перечислите защиты, действующие на останов пылеугольного барабанного парогенератора.

8. Как снижается нагрузка пылеугольного барабанного парогенератора защитой?

9. Как осуществляется защита барабанного парогенератора предохранительными клапанами?

10. Сравните защиты газомазутного и пылеугольного барабанных парогенераторов.

11. Как выполняется защита при прекращении подачи питательной воды в прямоточный парогенератор?

12. Охарактеризуйте защиты, связанные с установкой задвижки в водопаровом тракте прямоточного парогенератора.

35. ПОНЯТИЕ ОБ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ

Современная энергетика развивается преимущественно за счет строительства паротурбинных и атомных энергоблоков. К ним предъявляются повышенные требования по надежности и экономичности в работе. Работать они должны в условиях неравномерного графика электрической нагрузки в течение суток и недели. Это вызывает необходимость глубокой разгрузки энергоблоков тепловых электростанций или останова их с последующим пуском после кратковременного простоя.

Такие режимы работы паротурбинного энергоблока требуют от обслуживающего персонала выполнения большего числа операций, особенно в периоды плановых остановов и последующих пусков. Поскольку традиционные средства не обеспечивают автоматизацию режимов пуска и останова, возникла необходимость создания и внедрения систем всережимной автоматизации энергоблоков.

В связи с этим были развернуты работы по созданию и внедрению автоматизированных систем управления (АСУ).

АСУ представляет собой целесообразную совокупность средств управления, обеспечивающих эффективное управление энергоблоком во всех эксплуатационных режимах. Роль оператора в автоматизированной системе возрастает, так как он является ее главнейшим командным звеном.

По выполняемым функциям АСУ энергоблока может быть расчленена на следующие подсистемы: информационно-вычислительную, автоматического регулирования, функционально-группового управления, технологических защит, дистанционного управления.

Информационно-вычислительная подсистема собирает и обрабатывает обширную информацию о протекании технологических процессов и состоянии оборудования; регистрирует срабатывания защит, показатели наиболее важных параметров и сигнализирует об их отклонениях; рассчитывает технико-экономические показатели работы оборудования.

Важнейшие параметры, характеризующие режим и безопасность работы оборудования, контролируются обслуживающим персоналом с блочного щита управления. Дежурный персонал имеет возможность оперативного вмешательства в работу оборудования, если возникает необходимость изменения режима работы, а также в аварийных ситуациях. Для этого на блочный щит управления выведена необходимая информация и установлены средства дистанционного управления.

Подсистема автоматического регулирования обеспечивает требуемые значения технологических параметров в регулируемом диапазоне нагрузок, а также при пуске, останове оборудования и в аварийных ситуациях. Важнейшая задача этой подсистемы — обеспечить поддержание требуемой мощности энергоблока, либо ограничить его нагрузку в соответствии с состоянием основного и вспомогательного оборудования. В состав подсистемы входят всережимные и пусковые регуляторы. Всережимные регуляторы вводятся в действие при пуске оборудования и действуют в широком диапазоне изменений нагрузок. Пусковые регуляторы вводятся в действие только на период пуска оборудования.

Подсистема функционально-группового управления осуществляет автоматический пуск и останов оборудования, а также управляет им при изменениях режима работы энергоблока. Для этого оборудование энергоблока (парогенераторная и турбинная установки, генератор и общешлюзовые устройства) разбивается на ряд технологических узлов — функциональных групп. Каждая функциональная группа решает определенную технологическую задачу. Так, например, оборудование мощного газомазутного прямоточного парогенератора может быть разбито на следующие функциональные группы: температура первичного пара, температура вторичного пара, питание водой, пуско-сбросной узел, газозоодушный тракт, подача топлива.

Функциональная группа объединяет механизмы, за-

порную и регулирующую арматуру, а также автоматические регуляторы, средства контроля, технологической защиты и сигнализации. Действует функциональная группа автономно, так как она оснащается собственной системой управления, которая условно делится на уровни. Количество уровней — 2, 3 и более. Управляющие воздействия поступают от вышестоящего уровня к нижестоящему, а информация о выполнении команд — от нижестоящего уровня к вышестоящему.

Если система управления состоит из трех уровней, то к первому (нижнему) уровню относится управление отдельными исполнительными органами, работающими в режиме включен-отключен, открыто-закрыто и т. п. Сюда относятся электродвигатели собственных нужд, запорные органы и др.

Вторым (более высоким) уровнем является логическое устройство (логический автомат) управления. По заданной программе это устройство управляет группой взаимосвязанных исполнительных органов, автоматически включают резервный механизм при отключении работающего, формирует сигналы отсчета времени и др. При отказе логического устройства подчиненные ему исполнительные механизмы могут управляться дежурным персоналом.

Третьим уровнем является логическое устройство управления функциональной группой. Это логическое устройство формирует команды на нижестоящие уровни управления, осуществляя этапно-шаговый способ выполнения заданной программы.

Устройства функциональной группы осуществляют пуск и останов оборудования по заданной программе. Для некоторых функциональных групп предусматривается программа управления при изменениях режима работы оборудования.

Программа состоит из шагов. Каждый шаг соответствует элементарной технологической операции. Совокупность нескольких шагов образует этап, который охватывает законченную технологическую операцию. При выполнении каждого шага логическое устройство проверяет исходную информацию, в зависимости от которой формируются команды. Шаг состоит из одной или нескольких команд, выполняемых одновременно. Выполнение каждой команды проверяется по сигналу, поступающему в логическое устройство.

Программа, разбитая на шаги, может выполняться как поэтапно, так и непрерывно. При поэтапном выполнении программы разрешение на выполнение каждого этапа дает оператор. Такой порядок выполнения программы называется полуавтоматическим. При непрерывном выполнении программы оператор задает лишь конечную цель и разрешает начало операции. При этом программа выполняется автоматически.

Подсистема технологической защиты предназначена для выполнения операций управления оборудованием при возникновении аварийной ситуации. Действие защиты должно предотвратить развитие аварии, поэтому оно имеет приоритет над всеми видами управления оборудованием. Приоритет обеспечивается устройствами управления первого и второго уровней, которые воспринимают воздействия защит.

Подсистема дистанционного управления обеспечивает дежурному персоналу возможность воздействия в необходимых случаях на исполнительные органы. Дистанционное управление отдельными исполнительными органами осуществляется через устройства первого уровня. Дистанционное управление группой механизмов и исполнительных органов выполняется посредством устройств второго уровня.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баклушин П. А., Киселев И. К., Кубасова Л. И. Автоматизация теплоэнергетических установок. М.—Л., Госэнергоиздат, 1960.
2. Добкин В. М., Дулеев Е. М., Фельдман Е. П. Автоматическое регулирование тепловых процессов на электростанциях. М.—Л., Госэнергоиздат, 1959.
3. Герасимов С. Г. Теоретические основы автоматического регулирования тепловых процессов. М., «Высшая школа», 1967.
4. Кузьменко Д. Я. Автоматическое регулирование и технологические защиты паровых котлов. М., «Энергия», 1970.
5. Мануйлов П. Н. Автоматизация тепловых процессов на электростанциях. М., «Энергия», 1970.
6. Мануйлов П. Н. Теплотехнические измерения и автоматизация тепловых процессов. М., «Энергия», 1976.
7. Плетнев Г. П. Автоматическое регулирование и защита теплоэнергетических установок электрических станций. М., «Энергия», 1970.
8. Спейшер В. А., Горбаненко А. Д. Повышение эффективности использования газа и мазута в энергетических установках. М., «Энергия», 1974.
9. Айзенштат И. И., Полумордвинова И. Г., Фельдман Е. П. Методика расчета динамических характеристик пароперегревателейных участков котельных агрегатов. М., ОНТИ ЦКТИ, 1967.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Глава первая. Основные характеристики системы автоматического регулирования	6
1. Понятие о системе автоматического регулирования	6
2. Динамические звенья и их характеристики	12
3. Типовые элементарные динамические звенья	17
4. Классификация и основные характеристики автоматических регуляторов	26
5. Астатическое регулирование	31
6. Статическое регулирование	36
7. Изотропное регулирование	38
Глава вторая. Электронные регуляторы	41
8. Общие сведения	41
9. Измерительные преобразователи	43
10. Электронные регулирующие и корректирующие приборы	47
11. Электронные функциональные приборы	62
12. Электрические исполнительные механизмы	66
13. Пусковые устройства электрических исполнительных механизмов	69
14. Устройства для регулирования подачи угольной пыли в топку	73
Глава третья. Автоматическое регулирование питания и непрерывной продувки барабанных парогенераторов	77
15. Свойства парогенератора как объекта регулирования уровня	77
16. Пропорциональный регулятор питания	81
17. Комбинированный регулятор питания	84
18. Регулирование непрерывной продувки	87
Глава четвертая. Автоматическое регулирование процесса горения в барабанных парогенераторах	89
19. Основные задачи регулирования процесса горения	89
20. Свойства парогенератора как объекта регулирования давления пара и тепловой нагрузки	93
21. Особенности регулирования процесса горения при сжигании различных топлив	96
22. Структурные схемы автоматического регулирования процесса горения	100
23. Автоматическое регулирование процесса горения электронными регуляторами	108
Глава пятая. Автоматическое регулирование температуры перегрева пара	113
24. Требования, предъявляемые к регулированию температуры пара	113
25. Свойства парогенератора как объекта регулирования температуры перегрева пара	113
26. Регулирование температуры пара электронными регуляторами	117
	159

Глава шестая. Автоматическое регулирование прямоточных парогенераторов	123
27. Особенности прямоточного парогенератора как объекта регулирования	123
28. Автоматическое регулирование пылеугольных прямоточных парогенераторов	127
29. Автоматическое регулирование газомазутных прямоточных парогенераторов	132
Глава седьмая. Технологиеские защиты парогенераторов	139
30. Требования, предъявляемые к защитам парогенераторных установок	139
31. Защитные устройства	140
32. Защиты барабанного пылеугольного парогенератора	145
33. Защиты барабанного газомазутного парогенератора	149
34. Особенности технологических защит прямоточного парогенератора	151
35. Понятие об автоматизированной системе управления	155
Список литературы	158

Дмитрий Яковлевич Кузьменко

РЕГУЛИРОВАНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПАРОВЫХ КОТЛОВ

Редактор **А. Г. Чернов**

Редактор издательства **М. И. Кузнецова**

Художественный редактор **В. Ф. Горелов**

Обложка художника **В. Н. Хомякова**

Технический редактор **Г. С. Соловьева**

Корректор **И. А. Володьева**

ИБ № 629

Сдано в набор 26/VIII 1977 г. Подписано к печати 16/XI 1977 г. Т-20304
 Формат 84×108¹/₃₂ Бумага типографская № 2 Усл. печ. л. 8,4
 Уч.-изд. л. 8,78 Тираж 25 000 экз. Зак. 291 Цена 30 коп.

Издательство «Энергия», Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10
 Московская типография № 10 Союзполиграфпрома при Государственном комитете
 Совета Министров СССР по делам издательства, полиграфии и книжной торговли.
 Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.